



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JENNI ALAJÄRVI
SUOJAKUOREN KORROOSIOTUOTTEIDEN VAIKUTUS YDIN-
POLTTOAINEEN LÄMMÖNSIIRTOON YDINVOIMALAITOSYKSI-
KÖILLÄ OLKILUOTO 1 JA OLKILUOTO 2

Diplomityö

Tarkastajat: yliopistonlehtori Henrik
Tolvanen ja yliopistonlehtori Seppo
Syrjälä
Tarkastajat ja aihe hyväksytty
27. syyskuuta 2017

TIIVISTELMÄ

JENNI ALAJÄRVI: Suojakuoren korroosiotuotteiden vaikutus ydinpolttoaineen lämmönsiirtoon ydinvoimalaitosyksiköillä Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 67 sivua, 75 liitesivua

Huhtikuu 2018

Ympäristö- ja energiatekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Energia- ja biojalostustekniikka

Tarkastajat: Yliopistonlehtori Henrik Tolvanen ja yliopistonlehtori Seppo Syrjälä

Avainsanat: lämmönsiirto, lämmönsiirtokriisi, CPR, pinnankarheus, crud, oksidi

Ydinpolttoaineen turvallisessa käytössä on tärkeää huolehtia sen riittävästä jäähdyttämisestä. Polttoaineiden lämmönsiirron mallinnuksessa käytetään erilaisia korrelaatioita. Eri-tyisesti korrelaatiot, jotka mallintavat lämmönsiirtokriisiä, ovat tärkeitä. Lämmönsiirtokriisissä suojakuori joutuu kosketuksiin höyryfaasin kanssa johtaen lämmönsiirron heikkenemiseen ja suojakuoren lämpötilan nousuun. Jos lämpötila nousee tarpeeksi, suojakuori voi vaurioitua. Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2 -ydinvoimalaitosyksiköillä lämmönsiirtokriisiä kuvataan CPR-korrelaatioilla. CPR-korrelaatiot perustuvat kokeellisiin tuloksiin. Näissä korrelaatioissa ei kuitenkaan yleensä ole huomioitu oksidikerroksen ja crud-kerroksen vaikutusta. Tämän diplomityön tavoitteena oli selvittää, vaikuttaako suojakuoren pintaan muodostuva oksidi- ja crud-kerros lämmönsiirtoon ja lämmönsiirtokriisiin merkittävästi.

Kirjallisuudesta saatiin selville, että oksidi- ja crud-kerros kasvattavat lämpövastusta. Huokoinen crud-kerros voi kuitenkin tehostaa lämmönsiirtymistä rakenteensa vuoksi. Korroosiotuotteet myös nostavat suojakuoren pinnankarheutta, mikä lisää kuplien ydintymispaikkoja ja voi siten parantaa lämmönsiirtymistä. Karheus voi kuitenkin lisätä nesteen kulkeutumista höyryfaasiin ja laskea siten polttoaineen CPR-arvoa. Lisäksi karheus voi kasvattaa polttoaine-elementin kitkapainehäviötä. Tämä voi laskea CPR-arvoa.

Tämän työn laskentaosuudessa tavoitteena oli arvioida, kuinka paljon suojakuoren pinnankarheuden kasvu ja siitä seuraava kitkapainehäviön nousu voi laskea polttoaineen CPR-arvoa. Laskenta suoritettiin SIMULATE-3-sydänsimulaattorilla kasvattamalla polttoaine-elementtien yksifaasikitkakertoimia. Tulokseksi saatiin, että CPR-arvon lasku on maksimissaan 0–1 vuotiailla polttoaine-elementeillä 1 % ja 1–6 vuotiailla 3 %:a. Todellisuudessa 1–6 vuotiaiden lasku on luultavasti alle 2 %:a. Laskennassa tarkasteltiin myös reaktorin pienimmän CPR-arvon muuttumista. Kun 0–1 tai 1–2 vuotiailla karheus oli 1 μm , arvon lasku oli maksimissaan noin 1 %. Kun 1–2 vuotiailla karheus oli 3 μm , lasku oli maksimissaan noin 3 %:a. Todellisuudessa reaktorin MCPR luultavasti laskee alle 2 %:a. 2–6 vuotiaiden karheus nosti MCPR-arvoa.

Suojakuoren pinnankarheus saattaa kuitenkin kasvaa vain hieman korroosiotuotteiden vuoksi ja pintaa voidaan pitää sileänä veden yksifaasivirtauksessa. Tällöin polttoaine-elementtien yksifaasikitkakertoimia voitaisiin pitää tarpeeksi tarkkana ja jättää karheuden kasvu huomioimatta.

ABSTRACT

JENNI ALAJÄRVI: The Effect of Cladding Corrosion Products on Heat Transfer of Nuclear Fuel in the Nuclear Power Plant Units Olkiluoto 1 and Olkiluoto 2
 Tampere University of Technology
 Master of Science Thesis, 67 pages, 75 Appendix pages
 April 2018
 Master's Degree Programme in Environmental and Energy Engineering
 Major: Energy and Biorefining Technology
 Examiners: University Lecturer Henrik Tolvanen and University Lecturer Seppo Syrjälä

Keywords: heat transfer, heat transfer crisis, CPR, surface roughness, crud, oxide

In safe use of nuclear fuel, it is important to ensure sufficient cooling. Different correlations are used to model the heat transfer of fuel. Especially correlations that model the heat transfer crisis are important. In heat transfer crisis, the cladding comes into contact with the vapor phase resulting in reduction of the heat transfer and increase of cladding temperature. If temperature rises too high, the cladding could damage. Heat transfer crisis is modeled by CPR-correlations in nuclear power plant units Olkiluoto 1 and Olkiluoto 2. CPR-correlations are based on experimental results. However, the effect of oxide and crud layer are not generally considered in these correlations. The aim of this master's thesis was to study whether the formation of oxide and crud layer on cladding surface affect heat transfer and heat transfer crisis significantly.

It was found from literature that the oxide and crud layer increase the thermal resistance. However, the porous crud layer can improve the heat transfer because of its structure. Corrosion products also increase surface roughness leading to increased number of nucleation sites and therefore it might improve the heat transfer. On the other hand, the roughness may increase the liquid entrainment and thus decrease fuel CPR value. In addition, the roughness may increase the frictional pressure drop of fuel assembly. This may decrease CPR value.

In the calculational part of this work, the aim was to estimate how much the increase of cladding surface roughness and the subsequent increase of frictional pressure drop can decrease fuel CPR value. The calculation was performed with SIMULATE-3, the reactor core simulator, by increasing single-phase friction factors of fuel assemblies. As a result, the maximum decrease of CPR is 1 % with 0–1 years old fuel assemblies and 3 % with 1–6 years old fuel assemblies. In reality, the decrease with 0–6 years old fuel assemblies is probably less than 2 %. The change of reactor's minimum CPR was also studied. The maximum decrease of value was about 1 % when 0–1 and 1–2 years old fuel assemblies had 1 μm roughness. The maximum decrease was about 3 % when 1–2 years old fuel assemblies had 3 μm roughness. In reality, the decrease of MCPR is probably less than 2 %. The roughness of 2–6 years old fuel assemblies increased the MCPR value.

Nevertheless, the surface roughness of cladding may increase only slightly because of corrosion products and surface can be considered smooth in the single-phase flow of liquid. In this case, the single-phase frictions factors of fuel assemblies could be accurate enough and the increase of surface roughness could be ignored.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Teollisuuden Voima Oyj:n Polttoaine-yksikössä. Haluan kiittää Teollisuuden Voima Oyj:tä mahdollisuudesta diplomityöhön. Työn tekeminen on ollut hyvin mielenkiintoista ja opettavaista.

Haluan kiittää työni ohjaajaa Matti Paajasta saamistani neuvoista ja ohjauksesta. Apusi oli korvaamatonta työtä tehdessä. Kiitokset myös Tampereen teknillisen yliopiston yliopistonlehtoreille Henrik Tolvaselle ja Seppo Syrjälälle neuvoista ja hyvistä kommentteista. Kiitokset lisäksi kaikille muille, jotka auttoivat diplomityön etenemisessä. Erityiset kiitokset koko Polttoaine-yksikölle hyvästä ja kannustavasta työilmapiiristä.

Lopuksi lämpimät kiitokset rakkaalle avopuolisolleni Teijolle tuesta ja kannustuksesta.

Olkiluodossa, 19.3.2018

Jenni Alajärvi

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	OLKILUOTO 1 JA OLKILUOTO 2 -KIEHUTUSVESIREAKTORIEN KUVAUS 4	
3.	POLTTOAINESAUVAN SUOJAKUOREN KORROOSIOTUOTTEET.....	7
4.	YDINREAKTORIN TERMOHYDRAULIIKKA.....	9
4.1	Lämmön siirtyminen polttoainesauvassa	9
4.2	Lämmönsiirto polttoainesauvasta jäähdytteeseen	13
4.2.1	Kiehumistyytit	13
4.2.2	Yksifaasilämmönsiirto	14
4.2.3	Kaksifaasivirtauksen peruskäsitteitä	17
4.2.4	Kaksifaasilämmönsiirto.....	19
4.3	Painehäviö	21
4.4	Lämmönsiirtokriisi	25
4.5	Korroosiotuotteiden vaikutus lämmönsiirtoon.....	27
5.	TUTKIMUSMENETELMÄT JA AINEISTO	30
5.1	Ongelman asettelu, työvaiheet ja lähtöoletukset	30
5.2	Kitkakertoimen määrittäminen SIMULATE-3-ohjelmalle.....	33
5.3	Polttoaineiden ryhmittely ikäluokkiin	36
5.4	Polttoainesauvojen pinnankarheus	38
6.	TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU	40
6.1	Polttoainesauvojen pinnankarheus	40
6.2	Polttoainesauvojen karheuden vaikutus CPR-arvoihin ja aktiivivirtaukseen 43	
6.2.1	Karheuden vaikutus yleisellä tasolla.....	43
6.2.2	Polttoainesauvojen karheuden vaikutus reaktorin MCPR-arvoon. 48	
6.2.3	CPR-arvojen lasku eri ikäryhmillä ja yksittäisillä polttoaine- elementeillä	51
6.2.4	CPR-arvojen muuttuminen, kun karheus kehittyy ajan funktiona. 54	
6.3	Tulosten tarkastelu.....	58
7.	YHTEENVETO.....	61
	LÄHTEET	64

LIITE A: ERÄÄN 5 KÄYTTÖJAKSOA REAKTORISSA OLLEEN POLTTOAINE-
SAUVAN POIKKILEIKKAUSKUVIA ERI KORKEUKSILTA JA KULMISTA

LIITE B: OL2C37 - CPR:N JA AKTIIVIVIRTAUKSEN MUUTOKSET, KUN YH-
DELLÄ IKÄLUOKALLA ON KARHEUTTA JA MUUT OVAT SILEITÄ (0–1 V. 1
µM JA MUUT 3 µM)

LIITE C: OL2C37 - CPR:N JA AKTIIVIVIRTAUKSEN MUUTOKSET, KUN YKSITÄISILLÄ POLTTOAINE-ELEMENTEILLÄ ON KARHEUTTA

LIITE D: OL2C37 - CPR:N JA AKTIIVIVIRTAUKSEN MUUTOKSET, KUN YHDELLÄ IKÄLUOKALLA ON KARHEUTTA 20 μ M JA MUUT OVAT SILEITÄ

LIITE E: OL2C37 - KARHEUDEN VAIKUTUS KOKO REAKTORIN MCPR-ARVOON

LIITE F: OL2C37 - KOKO REAKTORIN MCPR-ARVON MUUTOKSET, KUN ERI IKÄLUOKILLE ON ANNETTU MAKSIMIKARHEUS

LIITE G: OL2C37 - ERI IKÄLUOKKIEN MCPR-ARVON MUUTTUMINEN, KUN IKÄLUOKALLE ON ANNETTU MAKSIMIKARHEUS

LIITE H: OL2C37 - CPR:N JA AKTIIVIVIRTAUKSEN MUUTOKSET, KUN KARHEUS KASVAA AJAN FUNKTIONA

LYHENTEET JA MERKINNÄT

BWR	Boiling Water Reactor
CFD	Computational Fluid Dynamics, numeerinen virtausdynamikka
CILC	Crud Induced Localized Corrosion
CHF	Critical Heat Flux, kriittinen lämpövuoto
CPR	Critical Power Ratio, kuivakiehuntasuhde
CRUD	Chalk River Unidentified Deposits
DNB	Departure From Nucleate Boiling
DNBR	Departure From Nucleate Boiling Ratio
EFPH	Effective Full Power Hour, täystehotunti
IAEA	International Atomic Energy Agency
MCPR	Minimum Critical Power Ratio, pienin CPR-arvo
NEA	Nuclear Energy Agency
OL1	Olkiluoto 1
OL1c39	Olkiluoto 1 39. käyttöjakso
OL2	Olkiluoto 2
OL2c37	Olkiluoto 2 37. käyttöjakso
OLMCPR	Operating Limit Minimum CPR, pienin sallittu CPR-arvo
STUK	Säteilyturvakeskus
TMOL	Thermal Mechanical Operating Limit, lineaaritehoraja
TVO	Teollisuuden Voima Oyj

A	virtauskanavan poikkipinta-ala [m^2]
C_0	konsentraatioparametri
c_p	ominaislämpö vakioaineessa [$\text{J}/(\text{kgK})$]
D_Q	Terminen halkaisija [m]
D_H	hydraulinen halkaisija [m]
d	halkaisija [m]
E	alueen, jossa jäähdye virtaa, suhde polttoainekanavan koko poikkipinta-alaan
f_D	Darcyn kitkakerroin
G	massavirrantiheys [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$]
g	putoamiskiihtyvyys [m/s^2]
h	entalpia [J/kg]
h_{conv}	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin polttoainesauvan seinämän ja jäähdytteen välillä [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]
h_{gap}	kaasuaukon lämmönsiirtokerroin [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]
h_{lg}	veden höyrystymislämpö [J/kg]
h_{nb}	kuplakiehunnan lämmönsiirtokerroin [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]
h_ϕ	lämmönsiirtokerroin [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]
j_g	höyryfaasin virtausnopeus (superficial velocity) [m/s]
j_l	nestefaasin virtausnopeus (superficial velocity) [m/s]
j_{tot}	kokonaisvirtausnopeus (superficial velocity) [m/s]
K	häviökerroin
k	lämmönjohtavuus [$\text{W}/(\text{mK})$]
L_A	rengasvirtauksen pituus [m]

L_B	kiehunnan pituus [m]
\dot{m}	massavirta [kg/s]
Nu	Nusseltin luku
$P_{coolant}$	märkäpiiri [m]
P_{rods}	polttoainesauvojen ja vesisauvojen kokonaispiiri [m]
Pr	Prandtlin luku
p	paine [Pa]
Δp_{acc}	kiihdytyspainehäviö [Pa]
Δp_{fr}	kitkapainehäviö [Pa]
Δp_{gr}	painovoiman aiheuttama painehäviö [Pa]
Δp_{local}	paikallinen painehäviö [Pa]
Q	teho [W]
q'	lineaariteho [W/m]
q''	lämpövuoto [W/m ²]
q'''	tehotiheys [W/m ³]
R	lämmönsiirtovastus [K/W]
R_{factor}	R-tekijä
Re	Reynoldsin luku
r	säde [m]
S	liukusuhte
s	polttoainesauvojen hilaväli [m]
T	lämpötila [K]
T_b	referenssilämpötila [K]
t	aika [s]
u	virtausnopeus [m/s]
u_g	höyryfaasin todellinen virtausnopeus [m/s]
u_l	nestefaasin todellinen virtausnopeus [m/s]
V	tilavuus [m ³]
\dot{V}	tilavuusvirta [m ³ /s]
V_{gj}	höyryn keskimääräinen kulkeutumisnopeus [m/s]
v_{gj}	höyryn kulkeutumisnopeus [m/s]
W	jäähdytevirtaus polttoaine-elementissä [kg/s]
X_{tt}	Martinelli-parametri
x	höyrypitoisuus
y	poikkeman etäisyys keskilinjasta [m]
z	akσιαalinen koordinaatti virtauskanavassa [m]
α	terminen diffuusiokerroin [m ² /s]
α_g	aukko-osuus
ε	karheus [m]
μ	dynaaminen viskositeetti [Ns/m ²]
ρ	tiheys [kg/m ³]
σ	pintajännitys [N/m]
Φ_{lo}^2	kaksifaasikerroin kitkapainehäviölle
Φ_{local}	kaksifaasikerroin paikalliselle painehäviölle
ν	kinemaattinen viskositeetti [m ² /s]

käytettyjä alaindeksejä ja merkintöjä:

<i>a</i>	aritmeettinen keskiarvo
<i>c</i>	suojakuori
<i>cr</i>	kriittinen
<i>crud</i>	crud-kerros
<i>f</i>	polttoainetabletti
<i>g</i>	höyry
<i>gap</i>	kaasuaukko
<i>He</i>	Helium
<i>in</i>	sisääntulo
<i>Kr</i>	Krypton
<i>l</i>	neste
<i>ls</i>	kylläinen neste
<i>out</i>	ulostulo
<i>ox</i>	oksidikerros
<i>rms</i>	neliöllinen keskiarvo
<i>rod</i>	polttoainesauva
<i>w</i>	polttoainesauvan seinämä
<i>Xe</i>	Ksenon
$\langle \rangle$	keskimääräinen arvo poikkileikkauksessa

1. JOHDANTO

Ydinvoimalaitokset ovat toimintaperiaatteeltaan lämpövoimalaitoksia, joissa sähköntuotanto perustuu veden kuumentamiseen ja turbiinin pyörittämiseen syntyneellä höyryllä (Salomaa et al. 2004, s. 26). Suomessa on tällä hetkellä toiminnassa neljä ydinvoimalaa, joista kaksi sijaitsevat Loviisassa ja kaksi Olkiluodossa. Lisäksi Olkiluotoon on rakenteilla kolmas ydinvoimalaitos ja Pyhäjoelle on suunnitteilla yksi voimalaitos. (Ydinvoima) Vuonna 2017 Suomessa tuotetusta sähköstä 33,2 % tuotettiin ydinvoimalla (Hakala 2018). Olkiluodon voimalaitoksilla Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2 (OL1 ja OL2) tuotetaan noin kuudesosa Suomessa käytettävästä sähköstä (TVO). Sähköntuotannon lisäksi ydinvoimalla on merkittävä rooli ilmastomuutoksen torjunnassa, sillä ydinvoiman käytöstä ei aiheudu kasvihuonepäästöjä. Tällä hetkellä ydinvoima onkin vesivoiman ohella merkittävin sähköntuotannon muoto, josta ei aiheutu päästöjä. (Ydinvoima)

Ydinenergia käytössä tulee huolehtia turvallisuudesta sekä normaalikäytössä että onnettomuustilanteiden aikana. Päästöjen estämiseksi turvallisuus varmistetaan moninkertaisin järjestelyin. (Turvallisuusperiaatteet) Ydinpolttoaineen turvallisen käytön kannalta on tärkeää huolehtia polttoainesauvojen riittävästä jäähdyttämisestä. Jos lämmönsiirto polttoainesauvasta jäähdytteeseen heikkenee, polttoainesauvan lämpötila voi nousta. Lämpötilan nousu voi heikentää polttoainesauvojen suojakuoren lujuusominaisuuksia ja korroosionkestävyyttä (Raiko 2014, s. 99). Jos lämpötilan nousu on suurta, voi suojakuori vaurioitua, jolloin kaasumaiset ja helposti höyrystyvät fissiotuotteet voivat vapautua jäähdytteeseen. Lisäksi vakavassa onnettomuudessa kuumenemisen jatkuessa pidempään voivat polttoainetabletit sulaa ja vapauttaa niihin sitoutuneita vaikeasti höyrystyviä fissiotuotteita. (Salomaa et al. 2004, s. 61) Vuodon tapahtuessa radioaktiivisten aineiden leviämisen esteenä on kuitenkin reaktorin paineastia, reaktorin suojarakennus ja reaktorirakennus (OL1&OL2 2013, s. 51).

Odotettavissa olevien käyttöhäiriöiden sekä oletettujen onnettomuuksien suunnitteluvaihtimuksena on, että vain pieni osa reaktorin polttoainesauvoista saa joutua lämmönsiirtokriisiin (YVL B.4 2013, s. 6). Lämmönsiirtokriisissä polttoainesauvan pinnalle muodostuu yhtenäinen höyryfaasi, jolloin lämmönsiirto polttoainesauvasta heikkenee huomattavasti (Todreas & Kazimi s. 744). Ydinvoimalaitoksilla Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2 lämmönsiirtokriisin analysoinnissa käytetään polttoainetoimittajien toimittamia korrelaatioita, joilla voidaan määrittää polttoaineille CPR-arvo (Critical Power Ratio). Korrelaatiot perustuvat kokeellisiin tuloksiin. Polttoaineen säteilytys kuitenkin aiheuttaa polttoaine-elementeissä mittamuutoksia, suojakuoren oksidoitumista sekä jäähdytteessä olevien korroosiotuotteiden saostumista suojakuoren oksidikerroksen pintaan niin sanotuksi crud-kerrokseksi, mitä puolestaan kokeissa ei voida käsitellä.

Säteilyturvakeskuksen (STUK) julkaisemissa ydinturvallisuusohjeissa (YVL-ohjeet) YVL B.4 kohdassa 409 sanotaan, että

”Mikäli säteilytyksellä on vaikutusta suojakuoren ja jäähdytteen väliseen lämmönsiirtoon, se on otettava huomioon myös lämmönsiirtokriisin arvioinnissa käytettävissä korrelaatioissa.” (YVL B.4 2013, s. 5)

YVL-ohjeen B.4 perustelumuistiossa sanotaan, että

”Polttoaineen palaman kasvaessa suojakuoren oksidikerros ja crud voivat muuttaa polttoaineen suojakuoren lämmönsiirto-ominaisuuksia. Tällä saattaa olla vaikutusta lämmönsiirtokriisin tapahtumiseen.” (Ohje YVL B.4 2013, s. 2)

Tämä asia on nostettu esille NEA:n (Nuclear Energy Agency) raportissa NEA/CSNI/R(99)25 *”Fuel Safety Criteria Technical Review”* (Ohje YVL B.4 2013, s. 2; NEA/CSNI/R(99)25 2000, s. 15). CPR-korrelaatiot on tavallisesti määritetty tuoreille polttoainesauvoille, joilla ei ole oksidikerrosta tai joilla sitä on vähän, jolloin korrelaatiot eivät välttämättä ole täsmällisiä korkean palaman polttoaineille (NEA/CSNI/R(99)25 2000, s. 15).

Tämän diplomityön tarkoituksena on toimia taustatyönä YVL B.4 vaatimuksen 409 täyttämisen selvittämiseksi. Työn tavoitteena on selvittää, vaikuttaako säteilytyksen aiheuttama oksidi- ja crud-kerroksen muodostuminen polttoainesauvan suojakuoren ja jäähdytteen väliseen lämmönsiirtoon sekä polttoaineen lämmönsiirtokriisiin. Tätä tutkitaan kirjallisuuden avulla sekä laskennallisesti suorittamalla simuloitteja Studsvik Scandpowerin SIMULATE-3-sydänlaskentaohjelmalla. Laskennassa arvioidaan oksidi- ja crud-kerroksen aiheuttaman suojakuoren pinnankarheuden kasvun ja sen myötä kitkan sekä kitkapainehäviön kasvun aiheuttamaa muutosta polttoaineen joutumisessa lämmönsiirtokriisiin. Lämmönsiirtokriisiä kuvaavana suurena käytetään CPR-arvoa. Tavoitteena on saada selville, kuinka paljon CPR-arvo voi laskea pinnankarheuden kasvun vuoksi.

Laskenta suoritetaan OL1:n 39. käyttöjaksolle ja OL2:n 37. käyttöjaksolle. Pinnankarheuden huomioimiseksi SIMULATE-3-ohjelmalle syötetään kertoimet, jolla se kasvattaa polttoainesauvoille menevän virtauksen yksifaasikitkakertoimia. Jotta karheuden vaikutuksesta saataisiin parempi ymmärrys, polttoaine-elementtien CPR-arvojen ja polttoainesauvoille menevän jäähdytevirtauksen muutoksia tarkastellaan, kun karheutta annetaan eri ikäisille polttoaine-elementeille ikäryhmä kerrallaan olettaen muut polttoaine-elementit sileiksi. Muutoksia tarkastellaan myös antamalla karheutta yksittäisille sekä kaikille polttoaine-elementeille. Lisäksi tarkastellaan, miten koko reaktorin pienin CPR-arvo muuttuu, kun eri ikäisille polttoaine-elementeille annetaan karheutta.

Jotta karheuden kasvun aiheuttama maksimivaikutus CPR-arvon ja reaktorin pienimmän CPR-arvon laskuun saataisiin selville, määritetään CPR-arvon ja reaktorin pienimmän

CPR-arvon suurin lasku, kun polttoaine-elementtien kitkakertoimia kasvatetaan ikäryhmä kerrallaan vastaamaan ikäryhmän määritettyä maksimikarheutta ja olettaen muut polttoaine-elementit sileiksi. Lisäksi maksimivaikutuksen tarkastelussa arvioidaan CPR-arvon suurin lasku, kun yksittäisille polttoaine-elementeille annetaan maksimikarheus ja oletetaan muut sileiksi. Laskennassa myös määritetään eri ikäryhmien CPR-arvojen ja reaktorin pienimmän CPR-arvon suurin lasku, kun polttoainesauvan karheus muuttuu ajan funktiona. Tällöin saadaan selville, mitä arvot todellisuudessa voisivat laskea.

Luvussa 2 on esitetty kuvaus Olkiluoto 1- ja Olkiluoto 2 -kiehutusvesireaktoreista. Luvussa kuvataan muun muassa laitoksien toimintaperiaatetta sekä käytettävää ydinpolttoainetta. Luvussa 3 kerrotaan oksidi- ja crud-kerroksen muodostumisesta suojakuoren pinnalle sekä niiden ominaisuuksista. Luvussa 4 puolestaan esitellään reaktorin termohydrauliikkaa. Luvussa on kuvattu lämmönsiirtymistä polttoainesauvassa sekä polttoainesauvasta jäähdytteeseen. Lisäksi luvussa kerrotaan painehäviöstä polttoaine-elementtien yli, lämmönsiirtokriisistä ja miten oksidi- ja crud-kerros vaikuttavat lämmönsiirtymiseen sekä lämmönsiirtokriisiin. Luvussa 5 on kuvattu työn laskennassa käytettyjä menetelmiä. Luvussa esitellään muun muassa laskennassa tehdyt oletukset sekä miten polttoaine-elementtien yksifaasikitkakertoimia kasvatettiin. Luvussa 6 esitetään saadut tulokset ja arvioitu tekijöitä, jotka ovat voineet vaikuttaa tulosten luotettavuuteen. Lopuksi luvussa 7 on koottu yhteen saadut päätulokset.

2. OLKILUOTO 1 JA OLKILUOTO 2 -KIEHUTUSVESIREAKTORIEN KUVAUS

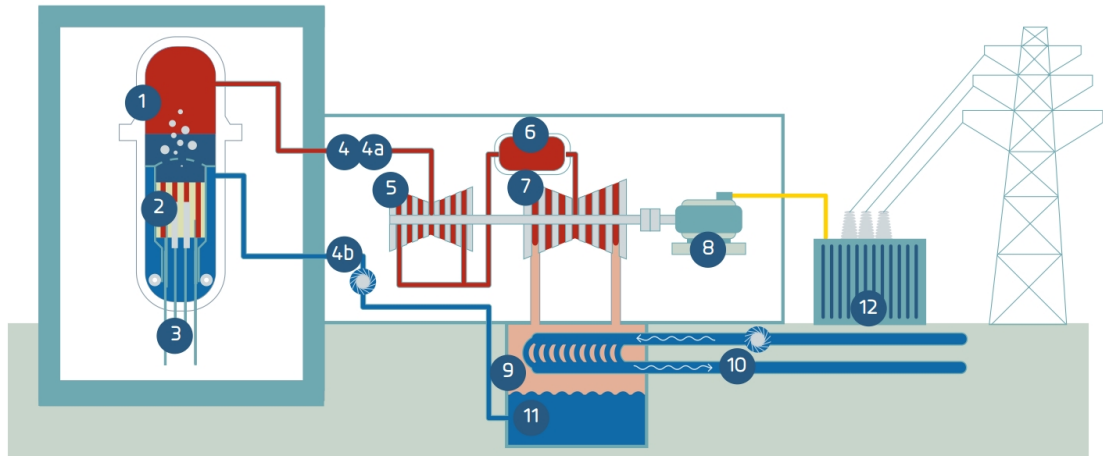
Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2 ovat Teollisuuden Voima Oyj:n (TVO) omistamia ydinvoimalaitoksia, jotka sijaitsevat Eurajoella Olkiluodon saarella. Laitokset ovat lähes identtisiä ja ne ovat tyypiltään kiehutusvesireaktoreita (BWR, Boiling Water Reactor). OL1-yksikön kaupallinen käyttö alkoi vuonna 1979 ja OL2-yksikön 1982. Laitokset on toimittanut AB Asea Atom. (OL1&OL2 2013, s. 5 ja 9) OL1:n nykyinen nettosähköteho on 880 MW ja OL2:n 890 MW (OL1 ja OL2).

OL1 ja OL2 ovat toimintaperiaatteeltaan lämpövoimalaitoksia, joiden energiantuotanto perustuu uraanipolttoaineen fissiossa tapahtuvaan lämmöntuotantoon. Fissiossa neutroni osuu uraaniyttimeen, joka halkeaa kahdeksi kevyemmäksi atomiytimeksi vapauttaen samalla lämpöä ja 2–3 neutronia. Nämä neutronit voivat puolestaan halkaista muita uraaniytimiä, jolloin syntyy ketjureaktio. Jotta neutroni pystyy halkaisemaan uraaniytimen, se pitää hidastaa. OL1- ja OL2-laitoksilla hidastimena käytetään vettä, joka toimii myös samalla jäähdyttinä. (OL1&OL2 2013, s. 7)

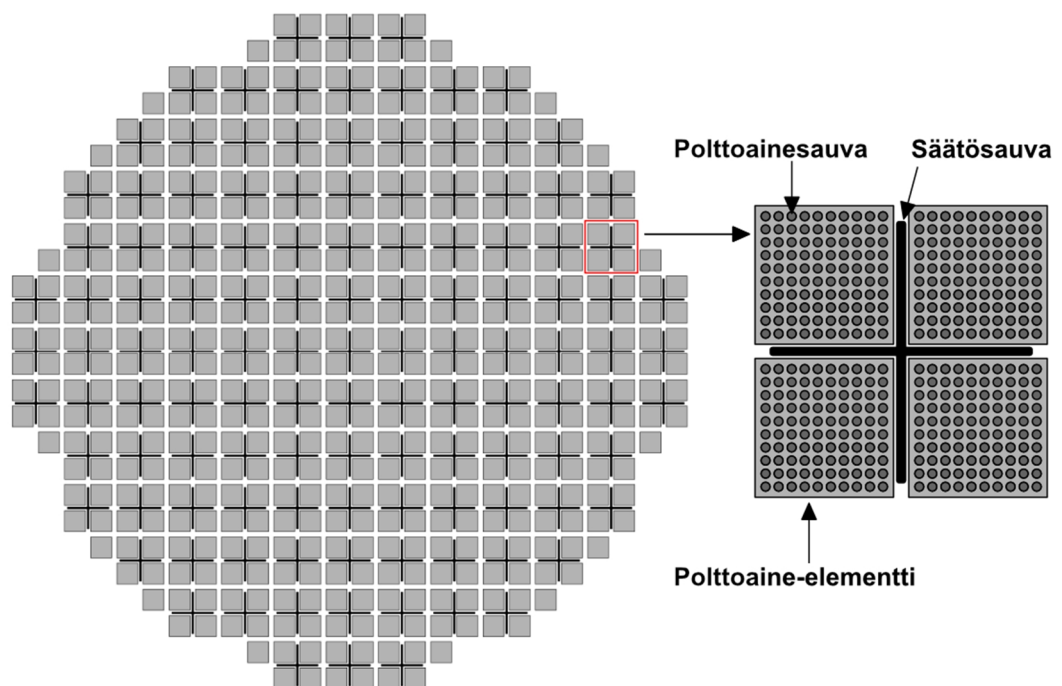
Kuvassa 1 on esitetty kiehutusvesilaitoksen toimintaperiaate. Reaktoriin syötetty vesi virtaa polttoainesauvojen välitse, jolloin se kuumenee ja osa siitä höyrystyy. Vesi-höyryseos ohjataan höyrynerottimiin, jossa suurin osa vedestä erotetaan seoksesta. Erotettu höyry johdetaan höyrynkuivaimeen, jossa jäljellä oleva vesi erotetaan höyrystä. Tämän jälkeen höyry ohjataan korkeapaineturbiinille, missä höyry luovuttaa osan energiastaan, jonka jälkeen se johdetaan välitulistimelle. Välitulistimella höyry kuivataan ja tulistetaan, minkä jälkeen höyry ohjataan matalapaineturbiineille. Korkeapaine- ja matalapaineturbiineille johdettu höyry pyörittää turbiineja. Turbiinit puolestaan pyörittävät samalle akselille kytkettyä generaattoria, jolloin turbiinin mekaaninen energia saadaan muutettua sähköksi. Matalapaineturbiineilta tuleva höyry ohjataan lauhduttimeen, jossa se lauhtuu vedeksi merivesipiirin avulla. Syntynyt lauhdevesi pumpataan puhdistusjärjestelmän ja lauhteen esilämmittimien kautta syöttövesipumpuille, jotka ohjaavat lauhteen syöttöveden esilämmittimien kautta takaisin reaktoriin. Lauhduttimessa lämmennyt merivesi johdetaan takaisin mereen. (OL1&OL2 2013, s. 9, 16)

OL1:n ja OL2:n reaktori koostuu muun muassa paineastiasta, reaktorisydäimestä, höyrynerottimesta, höyrynkuivaimesta, säätösauvoista, pääkiertopumpuista sekä hidastintankista. Kuvassa 2 on esitetty poikkileikkaus reaktorisydäimestä. Reaktorin tehoa säädellään säätösauvoilla ja pääkiertopumpuilla. Reaktorissa on yhteensä 121 säätösauvaa ja ne tulevat reaktoriin alhaalta. Säätösauvat ovat poikkileikkaukseltaan ristin muotoiset, jotka muodostavat neljän polttoaine-elementin kanssa ns. supercellin (kuva 2). Säätösauvojen

toiminta perustuu niiden sisältämään neutroneita absorboivaan booriin. Häiriö- ja onnettomuustilanteissa ketjureaktio saadaan pysäytettyä nopeasti laukaisemalla säätösauvat hydraulisesti typpipaineen avulla reaktorisydämeen. (OL1&OL2 2013, s. 9, 16 ja 22)



Kuva 1. Kiehumusvesilaitoksen toimintaperiaate. Kuvassa 1. reaktori, 2. reaktorisydän, jossa polttoaine-elementit, 3. säätösauvat, 4. primääripiiri, 4a. höyry turbiinille 4b. syöttövesi reaktoriin 5. korkeapaineturbiini, 6. välitulistin, 7. matalapaineturbiini, 8. generaattori, 9. lauhdutin, 10. merivesipiiri, 11. lauhde ja 12. muuntaja (Ydinsähköä Olkiluodosta 2012, s. 11)

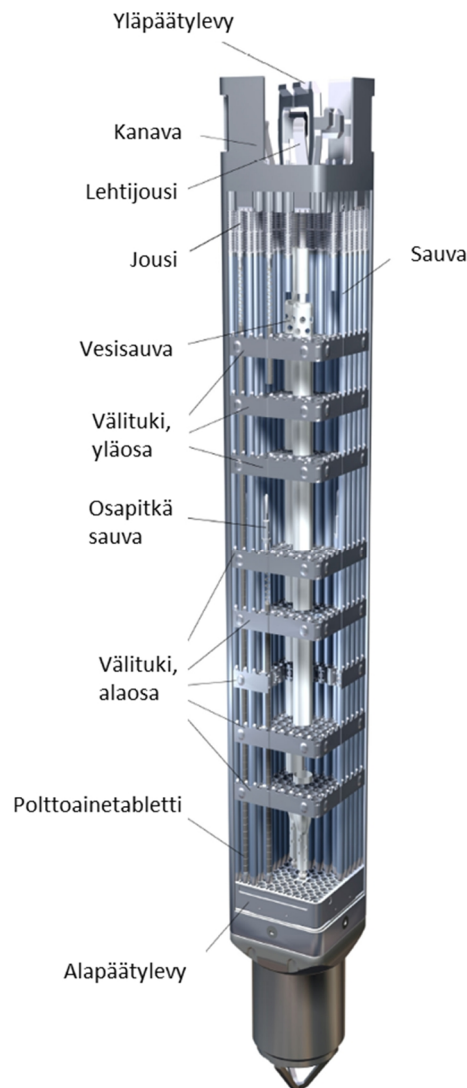


Kuva 2. Poikkileikkaus reaktorisydäimestä. Oikealla on esitetty neljän polttoaine-elementin ja säätösauvan muodostama supercell.

Polttaine-elementtejä reaktorisydäimessä on 500 kappaletta. OL1- ja OL2-laitoksilla käytettävä ydinpolttaine valmistetaan uraanidioksidista UO_2 . Uraanidioksidista puristetaan ja sintrataan pieniä tabletteja, jotka pinotaan päällekkäin seostetusta zirkonium-

metallista valmistettuihin putkiin, joiden päät suljetaan kaasutiiviisti. Tablettien ja metalliputkien muodostamaa kokonaisuutta kutsutaan polttoainesauvaksi. Tableteissa fissiilisen, hajoamiskelpoisen, U^{235} -isotoopin väkevöintiaste on 3–5 %:a. (OL1&OL2 2013, s. 18) Luonnonuraanissa U^{235} -isotooppia on vain 0,7 %:a (Raiko 2014, s. 10).

Polttoainesauvat kootaan nykyisin 10 x 10 tai 11 x 11 -sauvamatriisiin polttoainenipuksi, jotka tuetaan 6–8 välituella sekä ylä- ja alapäästä päätylevyillä. Kuvassa 3 on esimerkki polttoainenipun rakenteesta. Polttoainenippu sisältää polttoainesauvojen lisäksi vesikanavia. Polttoainesauvoja on yhdessä polttoainenipussa 91–112 kappaletta. Osa polttoainesauvoista on osapitkiä, mikä parantaa muun muassa reaktorin stabiilisuutta. Polttoainenippu sijoitetaan polttoainekanavaan, mikä ohjaa vesijäähdytteen polttoainesauvojen ympärille. (OL1&OL2 2013, s. 18–19) Polttoainenipun ja -kanavan muodostamaa kokonaisuutta kutsutaan polttoaine-elementiksi.

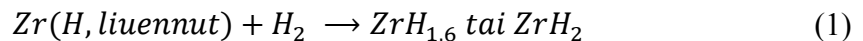


Kuva 3. GE14-tyyppisen polttoainenipun rakenne. (perustuu lähteeseen OL1&OL2 2013, s. 19).

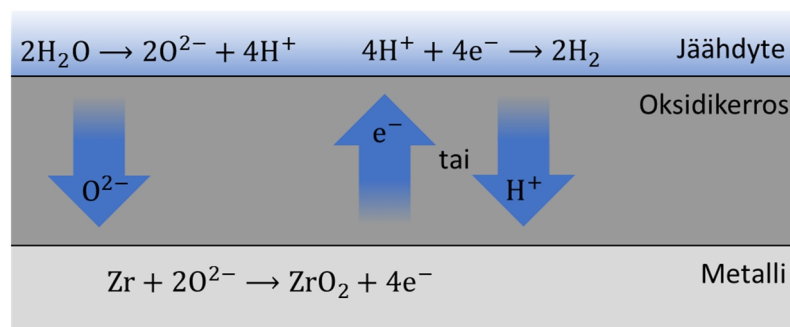
3. POLTTOAINESAUVAN SUOJAKUOREN KORROOSIOTUOTTEET

Seostettua zirkonium-metallia käytetään laajasti polttoainesauvojen suojakuorimateriaalina vesijäähdytteisissä reaktoreissa. Polttoaineen käytön aikana zirkonium kuitenkin reagoi jäähdytteessä olevan hapen kanssa muodostaen zirkoniumdioksidia. Happi voi olla vedessä joko liuenneena tai muodostua veden radiolyyssissä. Pieni määrä happea voi liueta zirkoniumiin, mutta tämän jälkeen muodostuu zirkoniumdioksidia. Zirkoniumin pinnalla oleva ohut oksidikerros kuitenkin suojaa korroosiolta, sillä se rajoittaa hapen pääsyä metalliin. Kuvassa 4 on havainnollistettu zirkoniumin korrodoitumista. Zirkoniumin hapettua vapautuu elektroneja, jotka siirtyvät oksidikerroksen läpi sähköisen neutraalisuuden säilyttämiseksi. Kun oksidikerroksen paksuus kasvaa, korroosion muodostuminen hidastuu. (Allen et al. 2012, s. 49–50) Oksidikerroksen paksuus on tyypillisesti välillä 10–60 µm ja pinnan karheus alle 0,5 µm käytetyillä reaktorista poistetuilla polttoaineilla (Buongiorno 2014, s. 16).

Zirkonium voi myös reagoida vedyn kanssa muodostaen zirkoniumdihydridiä. Vedyn liukoisuus zirkoniumiin on hyvin vähäistä. Kun liukoisuusraja on saavutettu, muodostuu zirkoniumhydridiä (reaktio 1). (Allen et al. 2012, s. 51)



Zirkoniumhydridin muodostuminen voi haurastuttaa suojakuorta (Allen et al. 2012, s. 50).



Kuva 4. Zirkoniumin korrodoituminen (perustuu lähteisiin Allen et al. 2012, s. 50 ja Motta et al. 2015, s. 321).

Polttoainesauvojen oksidikerroksen pinnalle saostuu käytön aikana jäähdytteestä korroosiotuotteita. Tätä korroosiotuotetta kutsutaan crudiksi, joka on lyhenne sanasta Chalk River Unidentified Deposits. (Michelsson 2016, s. 2) Crudin määrää ja koostumus riippuu muun muassa primääripiirin vesikemiasta sekä polttoaineen säteilytysajasta ja -historiasta

(Michelsson & Leskelä 2017, s. 17). Crudin koostumus ja morfologia vaihtelee eri ydinvoimalaitosten välillä. Buongiornon mukaan crud on yleensä koostumukseltaan huokoista ja sisältää suuria kanavia (2–10 μm), joista höyry pääsee kulkeutumaan pois. Crudin paksuus vaihtelee tyypillisesti muutamasta mikrometristä 120 mikrometriin ja sen pinnankarheus on noin 2,5 μm . (Buongiorno 2014, s. 16–17) Allen et al. mukaan crudin rakenne vaihtelee suuresti tiheästä huokoiseen. Rakenne kuitenkin tavallisesti jakautuu sisäisempään kerrokseen, joka on adherentti ja tiheä, sekä ulompaan kerrokseen, joka on huokoisempi. (Allen et al. 2012, s. 59) Kuvassa 5 on havainnollistettu crudin rakennetta.



Kuva 5. Crudin rakenne, jossa näkyy tiheä sisempi kerros ja huokoisempi ulompi kerros (perustuu lähteeseen Allen et al. 2012, s. 59).

Murtyn (Murty 2013, s. 213) mukaan kiehutusvesilaitoksilla crud on tyypiltään tavallisesti

- tiukasti kiinnittynyt, tiheä Fe_2O_3 (yleensä ohut kerros),
- heikosti kiinnittynyt Fe_2O_3 (yleensä hyvin huokoista),
- yhdistelmä kahdesta edellisestä (tiheä ja huokoinen kerros),
- tiukasti kiinnittynyt, tiheä $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Cu}$ tai CuO tai
- tiukasti kiinnittynyt, tiheä $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{ZnO}$ (ZnFe_2O_4)

Crud, joka sisältää myös kuparia (vaihtoehto 4 yllä), on haitallista ja voi saada aikaan crudin aiheuttamaa paikallista korroosiota (CILC, Crud Induced Localized Corrosion). Alimman vaihtoehdon ei tiedetä aiheuttaneen polttoainevaurioita. (Murty 2013, s. 213)

OL1- ja OL2-laitoksilla crudin rautapitoisuus on tyypillisesti suuri, mikä on edullista lämmönsiirron kannalta. Esimerkiksi vuonna 2016 OL1-laitoksella neljästä mitatusta polttoainepusta crudin rautapitoisuudeksi saatiin yli 90 %. Kuparipitoisuudet puolestaan ovat olleet pieniä, polttoainepussa yleensä keksimäärin alle 2,5 %. (Michelsson & Leskelä 2017, s. 17–19) Taulukossa 1 on esimerkiksi crudin keskimääräisestä koostumuksesta vuonna 2016 tutkituilla polttoainepuilla.

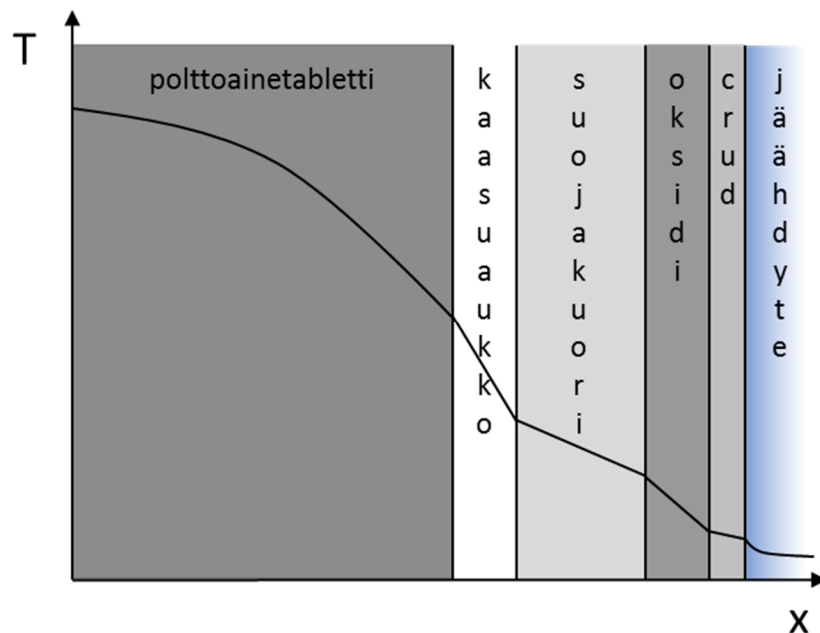
Taulukko 1. Crudin keskimääräinen koostumus vuonna 2016 tutkituilla polttoainepuilla (Fredriksson 2016, s. 15).

Alkuaine	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
Määrä [%]	0,3	0,6	0,0	91,6	0,9	6,6	0,0

4. YDINREAKTORIN TERMOHYDRAULIIKKA

4.1 Lämmön siirtyminen polttoainesauvassa

Polttoainesauva koostuu polttoainetabletista, suojakuoresta ja niiden välisestä kaasuaucosta. Polttoainetabletti tuottaa lämpöä, joka siirtyy kaasuaucun ja suojakuoren kautta jäähdytteeseen. (Akimoto et al. 2016, s. 255) Polttoainesauvan lämpötila riippuu muun muassa tuotetusta lämmöstä, materiaalien ominaisuuksista sekä jäähdytteen lämpötilasta. (Todreas & Kazimi 2011, s. 359) Polttoainetabletin ja suojakuoren välinen kaasuaucokko on usein täytetty heliumilla, joka on inertti kaasu ja jolla on hyvä lämmönjohtavuus (Lahey & Moody 1993, s. 294). Esimerkiksi ilmaan verrattuna heliumin lämmönjohtavuus on yli 10-kertainen (Raiko 2014, s. 78). Fissiossa kuitenkin muodostuu kaasumaisia fissiotuotteita, kuten ksenonia ja kryptonin, joiden lämmönjohtavuus on huonompi kuin heliumin ($k_{Xe}/k_{He} = 1/23$ ja $k_{Kr}/k_{He} = 1/15$). Tällöin kaasuaucun lämmönjohtavuus laskee käytön aikana. (Lahey & Moody 1993, s. 294) Tämän lisäksi polttoainetabletit halkeilevat ja paisuvat johtaen polttoainetabletin ja suojakuoren väliseen kontaktiin. Tämä kontakti pienentää kaasuaucun lämpövastusta ja siten tehostaa lämmönsiirtymistä. (Todreas & Kazimi 2011, s. 418)



Kuva 6. Lämpötilan käyttäytyminen sylinterin muotoisessa polttoainesauvassa siirryttäessä polttoainetabletista jäähdytteeseen.

Kuvassa 6 on havainnollistettu lämpötilan muuttumista sylinterin muotoisessa polttoainesauvassa siirryttäessä polttoainetabletista jäähdytteeseen. Lämpötila on suurimmallaan

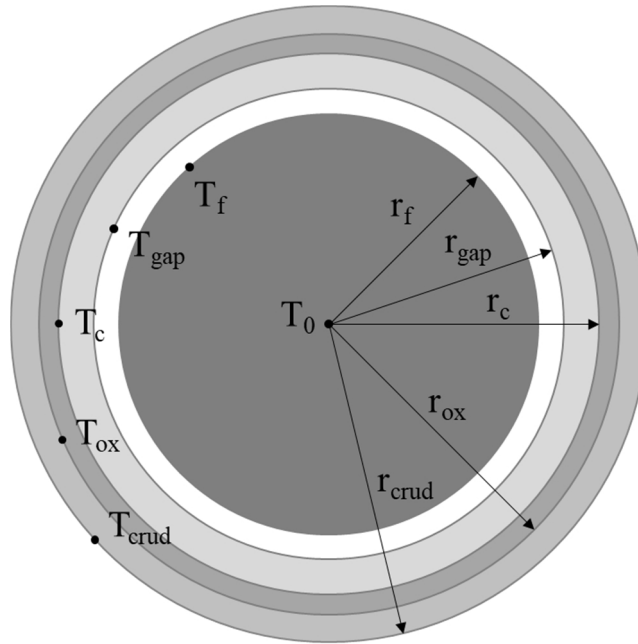
polttoainetabletin keskellä (Raiko 2014, s. 77). Lämpötila laskee polttoainetabletin reunalle mentäessä. Koska kaasuaikon lämmönjohtavuus on pienempi kuin suojakuoren, lämpötila laskee kaasuaikossa jyrkästi (Akimoto et al. 2016, s. 263). Kaasuaikon jälkeen lämpötila jatkaa laskuaan suojakuoressa ja jäähdytteessä. Lisäksi oksidi- ja crud-kerros vastustavat lämmönsiirtymistä.

Tarkastellaan seuraavaksi lämmönsiirtymistä polttoainesauvassa. Lämmönjohtuvuutta kuvaava yhtälö on muotoa

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + q''' \quad (2)$$

missä ρ on tiheys, c_p ominaislämpö, T lämpötila, t aika, k lämmönjohtavuus, ja q''' on teho tilavuutta kohti eli tehotiheys. (Lienhard V & Lienhard IV 2017, s. 143)

Kuvassa 7 on esitetty poikkileikkaus sylinterin muotoisesta polttoainesauvasta. Olkoon polttoainetabletin säde r_f , kaasuaikon säde r_{gap} , suojakuoren säde r_c , oksidikerroksen r_{ox} ja crud-kerroksen r_{crud} . Merkitään lämmönjohtuvuutta polttoainetabletissa suureella k_f , suojakuoressa k_c , oksidikerroksessa k_{ox} ja crud-kerroksessa k_{crud} . Olkoon kaasuaikon lämmönsiirtokerroin h_{gap} . Merkitään lämpötilaa polttoainetabletin keskellä suureella T_0 , polttoainetabletin reunalla T_f , kaasuaikon ulkoreunalla T_{gap} , suojakuoren ulkoreunalla T_c , oksidikerroksen ulkoreunalla T_{ox} ja crud-kerroksen ulkoreunalla T_{crud} .



Kuva 7. Sylinterin muotoisen polttoainesauvan poikkileikkaus.

Oletetaan, että lämmönjohtavuudet, kaasuaukon lämmönsiirtokerroin ja polttoainetabletin tehotiheys ovat vakioita. Oletetaan lisäksi, että lämpöä muodostuu vain polttoainetabletissa, tila on stationäärinen ja lämmönjohtuminen yksiulotteista. Lämmön johtumista sylinterin muotoisessa polttoainetabletissa voidaan kuvata kaavalla

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(k_f r \frac{dT}{dr} \right) + q''' = 0 \quad (3)$$

missä r on säde. (Akimoto 2016, s. 259–260)

Integroimalla yhtälö (3) saadaan (Todreas & Kazimi 2011, s. 390)

$$k_f r \frac{dT}{dr} = -\frac{q''' r^2}{2} + C_1 \quad (4)$$

missä C_1 on vakio.

Integroimalla yhtälö (3) toisen kerran saadaan

$$T = -\frac{q''' r^2}{4k_f} + \frac{C_1 \ln r}{k_f} + C_2 \quad (5)$$

missä C_2 on vakio. Tiedetään, että polttoainetabletin keskellä lämpötila on suurimmallaan. Tällöin reunaehdoiksi saadaan

$$\begin{cases} r = 0: \frac{dT}{dr} = 0 \\ r = 0: T = T_0 \end{cases} \quad (6)$$

Ensimmäisestä reunaehdosta saadaan $C_1 = 0$ ja toisesta $C_2 = T_0$, jolloin polttoainetabletin lämpötilaksi saadaan

$$T = T_0 - \frac{q''' r^2}{4k_f} \quad (7)$$

Lämpötilaero polttoainetabletin keskeltä ja tabletin ulkoreunalle on tällöin muotoa

$$T_0 - T_f = \frac{q'}{4\pi k_f} \quad (8)$$

missä $q' = \pi r_f^2 q'''$ on lineaariteho eli teho pituutta kohti. Lämpötilaero kaasuaukon yli puolestaan on (Todreas & Kazimi 2011, s. 425)

$$T_f - T_{gap} = \frac{q'}{2\pi r_{gap} h_{gap}} \quad (9)$$

Suojakuoressa ei muodostu lämpöä, joten lämmön johtumista suojakuoressa voidaan kuvata seuraavasti (Akimoto 2016, s. 261)

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (10)$$

Reunaehdot ovat seuraavat (Akimoto 2016, s. 261)

$$\begin{cases} r = r_{gap}: T = T_{gap} \\ r = r_c: T = T_c \end{cases} \quad (11)$$

Integroimalla yhtälö (10) ja sijoittamalla reunaehdot saadaan lämpötilaeroksi suojakuoren yli (Akimoto 2016, s. 261)

$$T_{gap} - T_c = \frac{q'}{2\pi k_c} \ln \frac{r_c}{r_{gap}} \quad (12)$$

Lämpötilaero oksidikerroksen yli saadaan kaavasta (Lahey & Moody 1993, s. 306)

$$T_c - T_{ox} = \frac{q'}{2\pi k_{ox}} \ln \frac{r_{ox}}{r_c} \quad (13)$$

Samalla periaatteella lämpötilaero crud-kerroksen yli on

$$T_{ox} - T_{crud} = \frac{q'}{2\pi k_{crud}} \ln \frac{r_{crud}}{r_{ox}} \quad (14)$$

Useista kerroksista muodostuvan sylinterin seinämän yli menevää lämpövirtaa voidaan kuvata seuraavalla kaavalla

$$q = \frac{\Delta T}{\Sigma R} \quad (15)$$

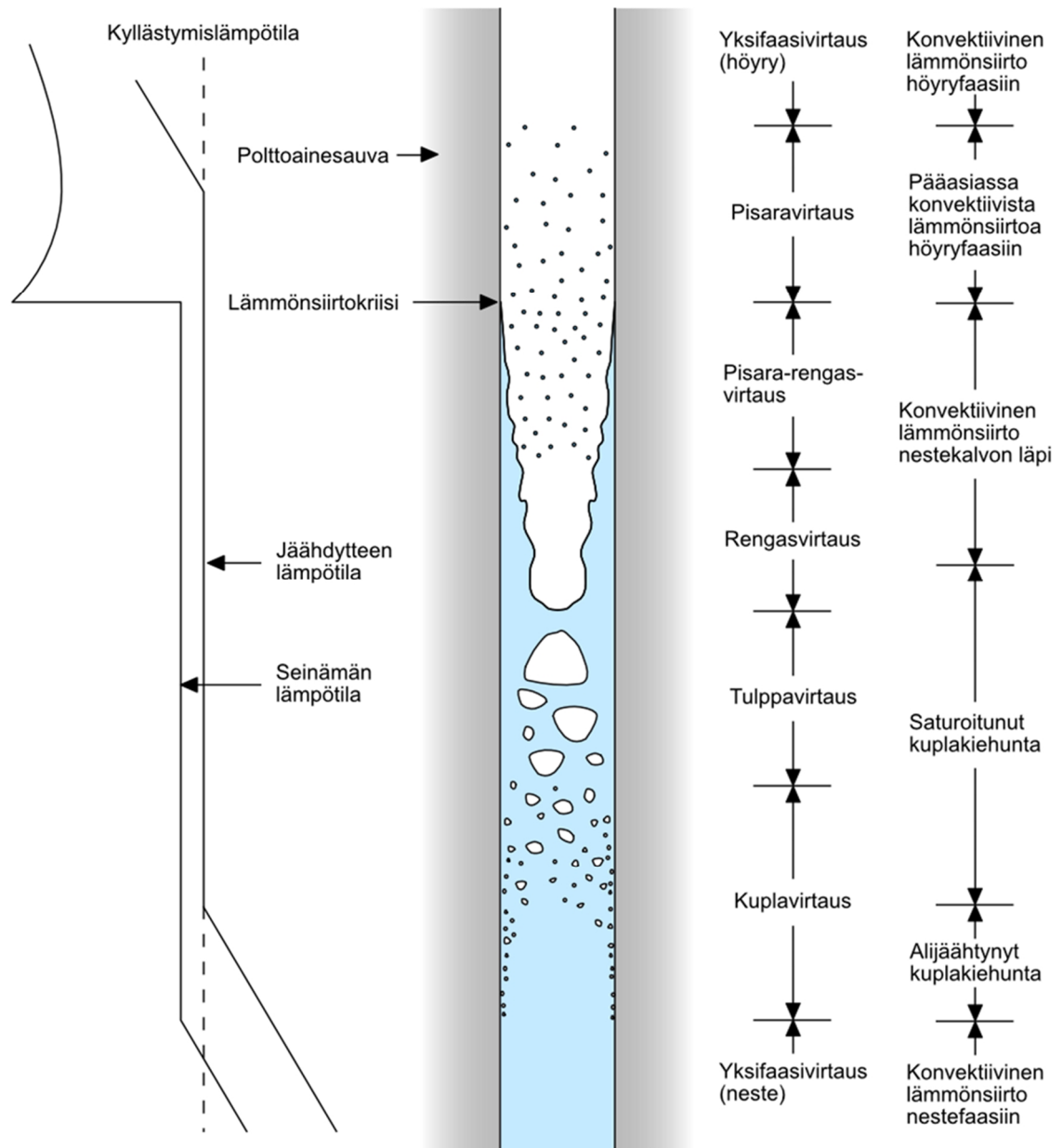
missä ΔT on lämpötilan muutos ja ΣR eri kerroksien lämmönsiirtovastuksien summa. (Incropera et al. 2006, s. 118). Tällöin kaavoista (8), (9), (12), (13) ja (14) saadaan

$$\begin{aligned} T_0 - T_{crud} = q' \left(\frac{1}{4\pi k_f} + \frac{1}{2\pi r_{gap} h_{gap}} + \frac{1}{2\pi k_c} \ln \frac{r_c}{r_{gap}} \right. \\ \left. + \frac{1}{2\pi k_{ox}} \ln \frac{r_{ox}}{r_c} + \frac{1}{2\pi k_{crud}} \ln \frac{r_{crud}}{r_{ox}} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

4.2 Lämmönsiirto polttoainesauvasta jäähdytteeseen

4.2.1 Kiehumistyytit

Koska suojakuoren pinnan lämpötila on suurempi kuin jäähdytteen, siirtyy lämpö suojakuoresta jäähdytteeseen. Jäähdytteen virratessa pystysuorassa virtauskanavassa sen virtauksessa on havaittavissa eri vaiheita. Kuvassa 8 on esitetty nämä vaiheet. Lisäksi kuvasta 8 on nähtävissä lämmönsiirtotavan muutokset sekä suojakuoren seinämän ja jäähdytteen lämpötilan muutokset.



Kuva 8. Virtaustyyppien ja lämmönsiirtotavan muutokset pystysuorassa virtauskanavassa (perustuu lähteisiin Todreas & Kazimi 2011, s. 742–744; Raiko 2014, s. 87).

Jäähdyte syötetään kanavaan alijäähtyneenä, jolloin lämmönsiirto tapahtuu ensin yksifaasisena. Kun edetään virtauksen suuntaan, seinämän ja jäähdytteen lämpötila kasvavat, kunnes seinämän lämpötila ylittää veden kyllästymislämpötilan. Tällöin seinämään alkaa muodostua kuplia. Virtaus on siis muuttunut kaksifaasiseksi. Nesteen keskimääräinen lämpötila on kuitenkin vielä alle kyllästymislämpötilan, joten kuplien muodostuminen rajoittuu vain seinämän läheisyyteen. Tätä vaihetta kutsutaan alijäähtyneeksi kuplakiehunnaksi. Virtaustyyppiä puolestaan kutsutaan kuplavirtaukseksi. (Todreas & Kazimi 2011, s. 742–743; Collier & Thome 1994, s. 170)

Alijäähtyneessä kuplakiehnassa seinämän lämpötila pysyy pääosin vakiona muutaman asteen kyllästymislämpötilaa korkeammassa lämpötilassa (Collier & Thome 1994, s. 170–171). Jäähdytteen lämpötila puolestaan jatkaa kasvuaan, kunnes sen keskimääräinen lämpötila saavuttaa kyllästymislämpötilan. Kun jäähdyte on saavuttanut kyllästymislämpötilan, alkaa saturoitunut kuplakiehnunta. Tässä vaiheessa seinämän lämpötila pysyy vakiona tehokkaan lämmönsiirtymisen vuoksi. Saturoituneessa kuplakiehnassa kuplien määrä kasvaa, seinämään kiinnittyneet kuplat alkavat irrota ja kuplat voivat yhdistyä isommiksi kupliksi. Virtaus on aluksi kuplavirtausta, mutta muuttuu tulppavirtaukseksi kuplien yhdistyessä suuriksi höyryalueiksi. Kiehumisen jatkuessa alkaa virtauskanavan keskelle muodostua yhtenäinen höyryalue, jota ympäröi vesirengas. Virtaus on muuttunut tällöin rengasvirtaukseksi. (Todreas & Kazimi 2011, s. 742–744)

Edetessä rengasvirtausalueessa kuplien muodostuminen seinämän pinnalla voi loppua ja lämmönsiirtomekanismi muuttuu konvektiiviseksi lämmönsiirroksi vesikerroksen läpi. Veden ja höyryn rajapinnalla lämpö siirtyy puolestaan höyrystymällä. Rajapinnalta myös kulkeutuu nestettä höyryn mukaan. Vähitellen nestekerros kuluu loppuun, jolloin seinämän pinta joutuu kosketuksiin höyryfaasin kanssa ja ajaututaan lämmönsiirtokriisiin. Lämmönsiirtokriisissä seinämän lämpötila nousee voimakkaasti, sillä lämmönsiirto höyryyn ei ole niin tehokasta kuin nesteeseen. Lämmönsiirtokriisin jälkeistä virtausta kutsutaan pisaravirtaukseksi. Pisaravirtauksessa höyryn seassa on pisaroita, jotka vähitellen katoavat ja virtaus muuttuu höyryn yksifaasivirtaukseksi. Höyryn yksifaasivirtauksessa lämmönsiirto tapahtuu konvektiolla höyryfaasiin. (Todreas & Kazimi 2011, s. 742–744)

Kuten kuvasta 8 nähdään, seinämän lämpötila saattaa laskea lämmönsiirtokriisin jälkeen. Tämä johtuu pisaravirtauksen pisaroiden törmäämisestä seinämään. Seinämän lämpötila kasvaa kuitenkin uudelleen ennen yksifaasihöyryvirtauksen alkua. Tämä johtuu puolestaan höyryn tulistumisesta. Koska lämpöä siirtyy pääasiassa konvektiolla höyryfaasiin, kasvaa seinämän lämpötila höyryn tulistumisen myötä. (Todreas & Kazimi 2011, s. 744)

4.2.2 Yksifaasilämmönsiirto

Yksifaasisessa lämmönsiirrossa eli lämmönsiirrossa, jossa fluidin faasi ei muutu, lämpö siirtyy konvektiolla. Lämpövuota polttoainesauvan seinämästä jäähdytteeseen voidaan kuvata Newtonin jäähdytyslailla

$$q'' = h_{conv}(T_w - T_b) \quad (17)$$

missä q'' on lämpövuoto, T_w polttoainesauvan seinämän lämpötila, T_b jäähdytteen referenssilämpötila ja h_{conv} on konvektiivinen lämmönsiirtokerroin seinämän ja jäähdytteen välillä (Lamarsh & Baratta 2001, s. 428). Referenssilämpötila T_b yleensä on sekoitettu keskilämpötila eli bulkkilämpötila

$$T_b = \frac{\int \rho c_p u T dA}{\int \rho c_p u dA} \quad (18)$$

missä u on jäähdytteen virtausnopeus, ρ jäähdytteen tiheys, c_p jäähdytteen ominaislämpö ja dA virtauskanavan pinta-aladifferentiaali. Kaikki muuttujat voivat olla paikkariippuvia. (Lamarsh & Baratta 2001, s. 429)

Lämmönsiirtokertoimen arvo riippuu monesta tekijästä. Esimerkiksi polttoainesauvan pinnankarheus, virtauskanavan mitat sekä jäähdytteen lämmönjohtavuus, tiheys, ominaislämpö ja viskositeetti vaikuttavat lämmönsiirtokertoimeen. Lämmönjohtavuus, tiheys, ominaislämpö ja viskositeetti puolestaan riippuvat reaktorissa vallitsevista olosuhteista, kuten lämpötilasta ja paineesta. Lämmönsiirtokertoimen määrittäminen teoreettisesti on vaikeaa, joten sen arvioimisessa käytetään yleensä kokeellisista mittauksista johdettuja korrelaatioita. Korrelaatiot ilmaistaan olosuhteet huomioon ottavien lukujen, Reynoldsin luvun Re , Prandtin luvun Pr ja Nusseltin luvun Nu , avulla. (Raiko 2014, s. 81)

Reynoldsin luku on muotoa

$$Re = \frac{D_H u \rho}{\mu} \quad (19)$$

missä μ on jäähdytteen dynaaminen viskositeetti, u jäähdytteen virtausnopeus, ρ jäähdytteen tiheys ja D_H virtauskanavan hydraulinen halkaisija. Hydraulinen halkaisija saadaan kaavalla

$$D_H = \frac{4A}{P_{coolant}} \quad (20)$$

missä on A virtauskanavan poikkipinta-ala ja $P_{coolant}$ märkäpiiri eli virtauskanavan poikkipinnan jäähdytteen kostuttaman piirin pituus. (Raiko 2014, s. 80–81)

Prandtin luku on muotoa

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} = \frac{\mu/\rho}{k/\rho c_p} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (21)$$

missä c_p on jäähdytteen ominaislämpö, k lämmönjohtavuus, ν kinemaattinen viskositeetti ja α termien diffuusiokerroin (Raiko 2014, s. 81).

Nusseltin luku on muotoa

$$\text{Nu} = \frac{h_{\phi} D_H}{k} \quad (22)$$

missä h_{ϕ} on lämmönsiirtokerroin (Raiko 2014, s. 81). Nusseltin luku voidaan myös esittää seuraavasti

$$\text{Nu} = C \text{Re}^m \text{Pr}^n \quad (23)$$

missä C , m ja n ovat vakioita (Lamarsh & Baratta 2001, s. 439). Kun vakiot ja olosuhteet tunnetaan, voidaan Nusseltin luvun avulla ratkaista lämmönsiirtokerroin h_{ϕ} .

Konvektiivisessa lämmönsiirrossa turbulenttiselle virtaukselle sileässä putkessa Nusseltin luku saadaan esimerkiksi Dittus-Boelterin korrelaatiolla. Korrelaatio on muotoa

$$\text{Nu} = 0,023 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^n \quad (24)$$

missä $n = 0,4$ lämmitettävälle virtaukselle, eli kun seinämän lämpötila on virtauksen lämpötilaa suurempi. (Incropera et al. 2006, s. 514)

Dittus-Boelterin korrelaatiota voidaan käyttää myös polttoaine-elementin läpi menevälle virtaukselle. Vakio C on tällöin neliöhilalle

$$C = 0,042 \frac{s}{d_{rod}} - 0,024 \quad (25)$$

ja kolmiohilalle

$$C = 0,026 \frac{s}{d_{rod}} - 0,006 \quad (26)$$

joissa s on polttoainesauvojen hilaväli ja d_{rod} polttoainesauvojen halkaisija. Neliöhilalle kaava pätee, kun s/d_{rod} on välillä 1,1–1,3, ja kolmiohilalle välillä 1,1–1,5. (Weisman 1959, s.79)

Molemmille hiloille vakio C voidaan ilmaista seuraavasti

$$C = 0,0333E + 0,0127 \quad (27)$$

missä E on alueen, jossa jäähydyte virtaa, suhde koko polttoainekanavan poikkipinta-alaan (Tong & Weisman 1996, s. 457). Tällöin Nusseltin luvuksi saadaan

$$\text{Nu} = (0,0333E + 0,0127) \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,4} \quad (28)$$

Yhtälöistä (22) ja (28) saadaan konvektiiviseksi lämmönsiirtokertoimeksi

$$h_{conv} = \frac{(0,0333E + 0,0127)Re^{0,8}Pr^{0,4}k}{D_H} \quad (29)$$

4.2.3 Kaksifaasivirtauksen peruskäsitteitä

Kaksifaasivirtauksella tarkoitetaan kahden eri faasin muodostaman seoksen virtausta. Kiehutusvesilaitoksella kaksifaasivirtaus on veden ja höyryn muodostaman seoksen virtausta. Kaksifaasivirtauksen kuvaamiseen käytettyjä tärkeitä suureina ovat höyrypitoisuus, aukko-osuus ja liukusuhte. Seuraavaksi esiteltävissä kaavoissa alaindeksillä g viitataan höyryyn ja alaindeksillä l nesteeseen. Höyrypitoisuus x määritellään höyryn massavirran suhteena kokonaismassavirtaan

$$x = \frac{G_g}{G_g + G_l} \quad (30)$$

missä G_g on höyryn massavirrantiheys ja G_l on nesteen massavirrantiheys (Akimoto 2016, s. 176). Kaavalla (30) höyrypitoisuus on nollan ja yhden välillä. Höyrypitoisuus voidaan ilmaista myös entalpioiden avulla seuraavasti

$$x = \frac{h - h_{ls}}{h_{lg}} \quad (31)$$

missä h on seoksen entalpia, h_{ls} kylläisen veden entalpia ja h_{lg} veden höyrytymislämpö. Kaavan (31) höyrypitoisuutta kutsutaan myös termodynaamiseksi pitoisuudeksi ja sillä höyrypitoisuus voi saada sekä positiivisia että negatiivisia arvoja:

- alijäähtynyt vesi: $x < 0$
- kylläinen vesi: $x = 0$
- kylläinen höyry-vesi seos: $0 < x < 1$
- kylläinen höyry: $x = 1$
- tulistettu höyry: $x > 1$. (Lewis et al. 2017, s. 316)

Aukko-osuus α_g puolestaan voidaan määritellä höyryfaasin pinta-ala- tai tilavuusosuutena. Esimerkiksi höyryfaasin tilavuusosuus on

$$\alpha_g = \frac{V_g}{V_g + V_l} \quad (32)$$

missä V_g on höyryn tilavuus ja V_l nesteen tilavuus. (Akimoto 2016, s. 177)

Kaksifaasivirtauksen virtausnopeuden esittämiseen on kaksi tapaa. Faasin todellista nopeutta u_i kuvataan sen tilavuusvirtana \dot{V}_i kyseisen faasin poikkipinnan läpi. Todelliselle nopeudelle saadaan siis

$$u_g = \frac{\dot{V}_g}{A_g} = \frac{\dot{V}_g}{\alpha_g A} \quad (33)$$

$$u_l = \frac{\dot{V}_l}{A_l} = \frac{\dot{V}_l}{(1 - \alpha_g)A} \quad (34)$$

Virtausnopeus voidaan myös esittää faasin tilavuusvirran suhteena koko virtauskanavan poikkipinta-alaan (engl. superficial velocity)

$$j_g = \frac{\dot{V}_g}{A} = \alpha_g u_g \quad (35)$$

$$j_l = \frac{\dot{V}_l}{A} = (1 - \alpha_g)u_l \quad (36)$$

$$j_{tot} = j_g + j_l \quad (37)$$

missä j_g on höyryfaasin virtausnopeus, j_l nestefaasin virtausnopeus ja j_{tot} kokonaisvirtausnopeus. (Akimoto 2016, s. 176, 178)

Kaksifaasivirtauksen homogeenisessa mallinnuksessa oletetaan, että kaasun ja nesteen nopeudet ovat samat. Yleensä kuitenkin nopeus on eri. Paikallisten nopeuserojen kuvaamiseksi on määritetty höyrylle kulkeutumisnopeus v_{gj} (engl. drift velocity). (Akimoto 2016, s. 180–181) Höyryn todellinen virtausnopeus voidaan myös kuvata kokonaisvirtausnopeuden ja höyryn kulkeutumisnopeuden summana (Todreas & Kazimi 2011, s. 625–626)

$$u_g = j_{tot} + v_{gj} \quad (38)$$

Kun yhtälö (38) keskiarvoistetaan ja painotetaan aukko-osuudella, saadaan keskimääräiseksi kulkeutumisnopeudeksi

$$V_{gj} = \frac{\langle \alpha_g (u_g - j_{tot}) \rangle}{\langle \alpha_g \rangle} \quad (39)$$

missä $\langle \rangle$ kuvaa keskimääräistä arvoa poikkileikkauksessa. (Akimoto 2016, s. 181)

Liukusuhte S on määritetty höyryn ja nesteen todellisten virtausnopeuksien suhteena (Akimoto 2016, s. 178)

$$S = \frac{u_g}{u_l} \quad (40)$$

Massavirrantiheydet voidaan lausua aukko-osuuden avulla seuraavasti (Akimoto 2016, s. 178)

$$G = G_g + G_l = \alpha_g \rho_g u_g + (1 - \alpha_g) \rho_l u_l \quad (41)$$

Seoksen tiheys puolestaan on (Akimoto 2016, s. 181)

$$\rho = \alpha_g \rho_g + (1 - \alpha_g) \rho_l \quad (42)$$

Seoksen massavirrantiheys voidaan myös ilmaista seuraavasti (Lahey & Moody 1993, s. 200–201)

$$G = \frac{\alpha_g \rho_g u_g}{x} = \frac{(1 - \alpha_g) \rho_l u_l}{1 - x} \quad (43)$$

mistä saadaan aukko-osuudelle, höyrypitoisuudelle ja liukusuhteelle seuraava yhteys

$$\alpha_g = \frac{x}{x + S \frac{\rho_g}{\rho_l} (1 - x)} \quad (44)$$

Aukko-osuuden ja höyrypitoisuuden yhteys voidaan myös ilmaista höyryn kulkeutumisen nopeuden ja konsentraatioparametrin C_0 avulla seuraavasti (Lahey & Moody 1993, s. 244)

$$\langle \alpha_g \rangle = \frac{\langle x \rangle}{C_0 \left[\langle x \rangle + \frac{\rho_g}{\rho_l} (1 - \langle x \rangle) \right] + \frac{\rho_g V_{gj}}{G}} \quad (45)$$

Konsentraatioparametrilla kuvataan aukko-osuuden ja virtausnopeuden jakaumaa. Sen yhtälö on muotoa (Lahey & Moody 1993, s. 242)

$$C_0 = \frac{\langle j_{tot} \alpha_g \rangle}{\langle j_{tot} \rangle \langle \alpha_g \rangle} \quad (46)$$

Konsentraatioparametri on suurempaa kuin yksi, jos aukko-osuus on suuri putken keskellä ja alle yhden, kun aukko-osuus on suuri putken seinämällä. Konsentraatioparametrille ja höyryn kulkeutumisnopeudelle on määritelty eri korrelaatioita laskennan helpottamiseksi. (Akimoto 2016, s. 183)

4.2.4 Kaksifaasilämmönsiirto

Kun veden lämpötila polttoainesauvan seinämän läheisyydessä on kasvanut riittävästi, muuttuu veden yksifaasilämmönsiirto alijäähtyneeksi kiehunnaksi. Alijäähtyneessä kiehunnassa kuplakiehunnan vaikutus lämmönsiirrossa kasvaa, kun taas konvektion vaikutus pienenee edettäessä virtauskanavassa. Lämpövuoto alijäähtyneelle kiehunnalle on

$$q'' = h_{conv}(T_w - T_b) + h_{nb}(T_w - T_{ls}) \quad (47)$$

missä h_{nb} on kuplakiehunnan lämmönsiirtokerroin. (Todreas & Kazimi 2011, s. 752)

Saturoituneessa kuplakiehuksessa jäähdyte on kyllästyslämpötilassa, joten lämpövuoksi saadaan (Todreas & Kazimi 2011, s. 754)

$$q'' = (h_{conv} + h_{nb})(T_w - T_{ls}) \quad (48)$$

Yksi yleinen korrelaatio saturoituneelle kuplakiehukselle on Chenin korrelaatio. Chenin korrelaatioissa konvektiivisena lämmönsiirtokertoimenä käytetään Dittus-Boelterin korrelaatiota, joka on kerrottu arvolla F

$$h_{conv} = \frac{0,023(Re_l)^{0,8}(Pr_l)^{0,4}k_l}{D_H} F \quad (49)$$

missä Re_l on Reynoldsin luku nesteelle, Pr_l Prandtlin luku nesteelle, k_l on nesteen lämmönjohtavuus. (Lahey & Moody 1993, s. 121)

Kertoimella F kuvataan höyryn aikaan saamaa virtauksen ja turbulenssin parantumista. Se on muotoa (Todreas & Kazimi 2011, s. 755)

$$F = \begin{cases} 1; & \frac{1}{X_{tt}} < 0,1 \\ 2,35 \left(0,213 + \frac{1}{X_{tt}} \right)^{0,736} & \frac{1}{X_{tt}} > 0,1 \end{cases} \quad (50)$$

missä X_{tt} on Martinelli-parametri. Parametri on muotoa (Lahey & Moody 1993, s. 249)

$$\frac{1}{X_{tt}} = \left(\frac{x}{1-x} \right)^{\frac{2-n}{2}} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0,5} \left(\frac{\mu_g}{\mu_l} \right)^{\frac{n}{2}} \quad (51)$$

missä n on Reynoldsin luvun eksponentti yhtälössä

$$f_D = \frac{C}{Re^n} \quad (52)$$

missä f_D on Darcyn kitkakerroin. (Lahey & Moody 1993, s. 249; Todreas & Kazimi 2011, s. 480) Turbulenttisessa virtauksessa sileässä putkessa voidaan approksimoida, että $C = 0,316$ ja $n = 0,25$, kun $Re \lesssim 2 \times 10^4$, sekä että $C = 0,184$ ja $n = 0,2$, kun $Re \gtrsim 2 \times 10^4$ (Incropera et al. 2006, s. 490).

Chenin käyttämä Martinelli-parametri on muotoa (Chen 1966, s. 329)

$$\frac{1}{X_{tt}} = \left(\frac{x}{1-x} \right)^{0,9} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0,5} \left(\frac{\mu_g}{\mu_l} \right)^{0,1} \quad (53)$$

Chenin korrelaatioissa kuplakiehunnan lämmönsiirtokerroin perustuu Forster-Zuberin yhtälöön, johon on lisätty kerroin S . Lämmönsiirtokerroin on muotoa

$$h_{nb} = 0,00122 \left[\frac{(k^{0,79} c_p^{0,45} \rho^{0,49})_l}{\sigma^{0,5} \mu_l^{0,29} h_{lg}^{0,24} \rho_g^{0,24}} \right] (T_w - T_{ls})^{0,24} \Delta p^{0,75} S \quad (54)$$

missä paineen muutos $\Delta p = p(T_w) - p(T_{ls})$ ja σ on pintajännitys. Kerroin S saadaan seuraavasti

$$S = \frac{1}{1 + 2,53 + 10^{-6} \text{Re}_{2\phi}^{1,17}} \quad (55)$$

missä $\text{Re}_{2\phi} = \text{Re}_l F^{1,25}$. (Todreas & Kazimi 2011, s. 755)

Re_l on muotoa (Lahey & Moody 1993, s. 121)

$$\text{Re}_l = \frac{G(1-x)D_H}{\mu_l} \quad (56)$$

Chenin korrelaatiota voidaan käyttää myös alijäähtyneelle kiehunalle. Tällöin $F = 1$ ja kerrointa S laskettaessa höyrypitoisuus $x = 0$. (Todreas & Kazimi 2011, s. 752)

Jäähdytteen edetessä virtauskanavassa virtaus muuttuu rengasvirtaukseksi. Rengasvirtauksessa lämmönsiirtyminen voi tulla niin tehokkaaksi, että kuplien muodostuminen seinämän pinnalla loppuu ja lämmönsiirtomekanismi muuttuu konvektiiviseksi lämmönsiirroksi vesikerroksen läpi. Neste ja höyry rajapinnalta lämpö siirtyy höyrystymällä. Nestekalvosta lisäksi kulkeutuu vesipisaroita höyryyn mukaan, mikä ohentaa nestekalvoa. (Todreas & Kazimi 2011, s. 744, 753)

4.3 Painehäviö

Jäähdytteen virratessa polttoaine-elementin läpi sen paine alenee erilaisten häviöiden vuoksi. Painehäviö koostuu kiihdytyspainehäviöstä, painovoiman aiheuttamasta painehäviöstä, kitkapainehäviöstä sekä paikallisista painehäviöistä. Paikallista painehäviötä aiheutuu virtausesteistä, kuten välituista, sekä virtauksen äkillisestä kuristumisesta tai laajenemisesta. Kokonaispainehäviön kaava on muotoa

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_{acc} + \Delta p_{gr} + \Delta p_{fr} + \Delta p_{local} \quad (57)$$

missä Δp_{acc} on kiihdytyspainehäviö, Δp_{gr} painovoiman aiheuttama painehäviö, Δp_{fr} kitkapainehäviö sekä Δp_{local} paikallinen painehäviö. (Lahey & Moody 1993, s. 266, 275)

Kiihdytyspainehäviö Δp_{acc} saadaan seuraavalla kaavalla (Todreas & Kazimi 2011, s. 639–640)

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{acc} = \frac{d}{dz} \left\{ G^2 \left[\frac{(1-x)^2}{(1-\alpha_g)\rho_l} + \frac{x^2}{\alpha_g\rho_g} \right] \right\} \quad (58)$$

missä z on virtauskanavan aksiaalinen koordinaatti. Virtauskanavan alussa eli, kun $z = 0$, höyrypitoisuus $x = 0$ ja $\alpha_g = 0$. Tällöin kokonaiskiihdytyspainehäviöksi saadaan (Todreas & Kazimi 2011, s. 639–640)

$$\Delta p_{acc} = G^2 \left\{ \left[\frac{(1-x)^2}{(1-\alpha_g)\rho_l} + \frac{x^2}{\alpha_g\rho_g} \right]_{out} - \left[\frac{1}{\rho_l} \right]_{in} \right\} \quad (59)$$

Painovoiman aiheuttama painehäviö puolestaan on muotoa (Lewis et al. 2017, s. 352)

$$\Delta p_{gr} = \rho g \Delta z \quad (60)$$

missä g on putoamiskiihtyvyyys. Paikallinen painehäviö puolestaan voidaan ilmaista seuraavasti (Lahey & Moody 1993, s. 276)

$$\Delta p_{local} = K \frac{G^2}{2\rho_l} \phi_{local} \quad (61)$$

missä ϕ_{local} on kaksifaasikerroin paikalliselle painehäviölle ja K on häviökerroin.

Yksifaasivirtauksen kitkapainehäviö on muotoa (Lahey & Moody 1993, s. 266–267)

$$\Delta p_{fr,1\phi} = f_D \frac{G^2}{2\rho_l} \frac{\Delta z}{D_H} \quad (62)$$

Kokeelliset tulokset ovat osoittaneet, että kaksifaasivirtauksessa painehäviö voi olla paljon suurempi kuin yksifaasivirtauksella. Kaksifaasivirtauksen kitkapainehäviön laske-
miseksi yksifaasivirtauksen kitkapainehäviön kaava (62) kerrotaan kaksifaasikertoimella ϕ_{lo}^2 seuraavasti (Lahey & Moody 1993, s. 267)

$$\Delta p_{fr,2\phi} = f_D \frac{G^2}{2\rho_l} \frac{\Delta z}{D_H} \phi_{lo}^2 \quad (63)$$

Kaksifaasikertoimelle on määritetty eri korrelaatioita, kuten Chisholmin ja Martinelli-Nelsonin korrelaatiot. Chisholmin korrelaatio on muotoa (Rohsenow et al. 1998, s. 39; Serth 2014, s. 333)

$$\phi_{lo}^2 = 1 + (Y^2 - 1) \left\{ B[x(1-x)]^{\frac{2-n}{2}} + x^{2-n} \right\} \quad (64)$$

missä n on Reynoldsin luvun eksponentti kaavassa (52). Turbulenttiselle virtaukselle si-
leässä putkessa Y on määritetty seuraavasti (Chisholm 1973, s. 349)

$$Y = \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0,5} \left(\frac{\mu_g}{\mu_l} \right)^{\frac{n}{2}} \quad (65)$$

missä n on Reynoldsin luvun eksponentti kaavassa (52). Sileälle putkelle B saadaan puolestaan taulukosta 2.

Taulukko 2. B sileälle putkelle (Chisholm 1973, s. 353).

Y	$G \left[\frac{kg}{m^2s} \right]$	B
$Y \leq 9,5$	$G \leq 500$	4,8
	$500 < G < 1900$	$\frac{2400}{G}$
	$G \geq 1900$	$\frac{55}{G^{0,5}}$
$9,5 < Y < 28$	$G \leq 600$	$\frac{520}{YG^{0,5}}$
	$G > 600$	$\frac{21}{Y}$
$Y \geq 28$		$\frac{15000}{Y^2 G^{0,5}}$

Chisholmin korrelaation lisäksi kaksifaasikerroin voidaan laskea Martinelli-Nelsonin korrelaatiolla. Jonesin ehdottama Martinelli-Nelsonin kaksifaasikerroin ϕ_{lo}^2 on muotoa

$$\phi_{lo}^2 = 1,2 \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} - 1 \right) x^{0,824} + 1 \quad (66)$$

Jones sisällytti myöhemmin Martinelli-Nelsonin kaksifaasikertoimen kaavaan massavirrantiheyden. Jonesin ehdottama kaava on muotoa

$$\phi_{lo}^2 = \Omega(P, G) \left[1,2 \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} - 1 \right) x^{0,824} + 1 \right] \quad (67)$$

missä

$$\Omega(P, G) = \begin{cases} 1,36 + 0,0005p + 0,1 \frac{G}{10^6} - 0,000714p \frac{G}{10^6} & \frac{G}{10^6} \leq 0,7 \\ 1,26 - 0,0004p + 0,0119 \frac{10^6}{G} + 0,00028p \frac{10^6}{G} & \frac{G}{10^6} > 0,7 \end{cases} \quad (68)$$

missä massavirrantiheys G on yksikössä $\text{lb}/(\text{h ft}^2)$ ja paine p yksikössä psia . (Lewis et al. 2017, s. 358–359)

Yksifaasi- ja kaksifaasikitkapainehäviön kaavassa oleva Darcyn kitkakerroin voidaan ratkaista käyttämällä korrelaatiota tai katsomalla arvo Moodyn käyrästä. Eri korrelaatioita voidaan käyttää riippuen virtausominaisuuksista. Täysin kehittyneelle laminaarille virtaukselle voidaan käyttää kaavaa

$$f_D = \frac{64}{\text{Re}} \quad (69)$$

Kaavasta (69) nähdään, että pinnankarheus ei vaikuta kitkakertoimeen laminaarissa virtauksessa. Turbulenttisessa virtauksessa kitkakerroin puolestaan kasvaa pinnankarheuden kasvaessa. (Incropera et al. 2006, s. 490) Turbulenttisessa virtauksessa putki voidaan jakaa seuraavasti (Lienhard V & Lienhard IV 2017, s. 364–365)

$$\text{Re} \frac{\varepsilon}{d} \sqrt{\frac{f_D}{8}} < 5 \quad \text{hydraulisesti sileä} \quad (70)$$

$$5 \leq \text{Re} \frac{\varepsilon}{d} \sqrt{\frac{f_D}{8}} \leq 70 \quad \text{siirtymäalue} \quad (71)$$

$$\text{Re} \frac{\varepsilon}{d} \sqrt{\frac{f_D}{8}} > 70 \quad \text{hydraulisesti karhea} \quad (72)$$

missä d on putken halkaisija ja ε on putken karheus, joka kuvaa pinnassa olevien epätasaisuuksien korkeutta. Sileässä putkessa Darcyn kitkakertoimen ratkaisemiseksi voidaan käyttää esimerkiksi aikaisemmin esitettyä kaavaa (52). Vaihtoehtoisesti Darcyn kitkakerroin voidaan ratkaista seuraavalla Petukhovin korrelaatiolla, kun $3000 \lesssim \text{Re} \lesssim 5 \times 10^6$ (Incropera et al. 2006, s. 490)

$$f_D = (0,790 \ln \text{Re} - 1,64)^{-2} \quad (73)$$

Turbulenttiselle virtaukselle Darcyn kitkakerroin voidaan laskea Colebrookin yhtälöllä sekä sileässä että karheassa putkessa ja siirtymäalueella. Yhtälö on muotoa (Colebrook 1939, s. 137)

$$\frac{1}{\sqrt{f_D}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7d} + \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{f_D}} \right) \quad (74)$$

Moody piirsi Colebrookin yhtälöstä käyrän, jota kutsutaan nykyään Moodyn käyrästäksi (Genić et al. 2011, s. 67). Moodyn käyrästä on esitetty Darcyn kitkakertoimen, Reynoldsin luvun sekä suhteellisen karheuden yhteys. Suhteellinen karheus saadaan, kun putken seinämän karheus jaetaan putken halkaisijalla. (Incropera et al. 2006, s. 490–491).

Karheus ε voidaan määrittää tutkimalla pinnassa olevien epätasaisuuksien poikkeamista keskilinjasta. Karheus voidaan ilmaista muun muassa aritmeettisena tai neliöllisenä keskiarvona. Karheuden aritmeettinen keskiarvo on muotoa

$$\varepsilon_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (75)$$

missä y_i on poikkeaman etäisyys keskilinjasta. (Gadelmawla et al. 2002, s. 133–134) Karheuden neliöllinen keskiarvo (RMS, engl. Root Mean Square) puolestaan on muotoa (Gadelmawla et al. 2002, s. 134)

$$\varepsilon_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2} \quad (76)$$

4.4 Lämmönsiirtokriisi

Polttoainesauva joutuu lämmönsiirtokriisiin, kun höyrypitoisuus kasvaa niin suureksi, että polttoainesauvan suojakuoren pinnalla oleva nestekerros häviää ja suojakuori joutuu kosketuksiin höyryfaasin kanssa. Lämmönsiirtokriisissä lämmönsiirtyminen polttoainesauvasta huononee merkittävästi, sillä lämpö siirtyy huonommin höyryyn kuin veteen. Huonon lämmönsiirtymisen seurauksena polttoainesauvan suojakuoren lämpötila nousee voimakkaasti. (Todreas & Kazimi s. 744) Tämä voi puolestaan johtaa lujuusominaisuuksien ja korroosionkestävyyden heikkenemiseen. Jos lämpötilan nousu on suurta, saattaa suojakuori murtua tai sulaa. Lämpövuon arvoa, joka johtaa lämmönsiirtokriisiin, kutsutaan kriittiseksi lämpövuoksi (CHF, Critical Heat Flux) (Raiko 2014, s. 99)

Jos lämpövuon on tarpeeksi suuri, voi lämmönsiirtokriisi tapahtua aikaisemmin kuplakiehunta-alueella. Lämpövuon ollessa suuri höyrykuplien esiintymistiheys voi kasvaa kuplakiehunta-alueella niin suureksi, että polttoainesauvan pinnalle muodostuu yhtenäisen höyrykalvo ja polttoaine-elementti joutuu lämmönsiirtokriisiin. Tällaisessa lämmönsiirtokriisissä käytetään termiä DNB (Departure from Nucleate Boiling). Lämmönsiirtokriisissä, jossa nestekerros häviää kokonaan, käytetään termiä kuivakiehunta (engl. dryout). (Todreas & Kazimi s. 744) DNB riippuu paikallisista olosuhteista, kun taas kuivakiehunta virtauskanavan historiasta. Tämän vuoksi DNB-ilmiötä kuvataan lämpövoiden suhteena ja kuivakiehuntaa tehojen suhteena. (Todreas & Kazimi s. 38)

Kiehutusvesilaitoksilla käytetään tavallisesti lämmönsiirtokriisin kuvaamiseen kuivakiehuksuhdetta eli CPR-arvoa (Critical Power Ratio), kun taas painevesilaitoksilla käytetään yleensä DNBR-arvoa (Departure From Nucleate Boiling Ratio) (Buongiorno 2014, s. 13). DNBR-arvo on CHF-arvon ja todellisen lämpövuon suhde (Lamarsh & Baratta

2001, s. 451). CPR-arvo puolestaan kuvaa polttoaine-elementin kriittisen ja todellisen tehon suhdetta. Kriittisellä teholla tarkoitetaan tehoa, jossa polttoaine-elementti joutuu lämmönsiirtokriisiin. (GEXL17 2007, s. 9–10) Jotta polttoaine-elementti ei joutuisi lämmönsiirtokriisiin, tulee polttoaine-elementin CPR-arvo olla yli yhden.

CPR-arvon määrittämiseksi on monia korrelaatioita. Esimerkiksi GEXL-korrelaatiolla voidaan määrittää CPR-arvo. GEXL-korrelaatiossa käytetään lämmönsiirtokriisin alkamisen määrittämiseksi kriittistä höyrypitoisuutta. Korrelaation kriittinen höyrypitoisuus x_{cr} voidaan ilmaista kiehunnan pituuden L_B , terminen halkaisijan D_Q , massavirrantiheyden G , paineen p , R-tekijän R_{factor} ja rengasvirtauksen pituuden L_A funktiona

$$x_{cr} = f(L_B, D_Q, G, p, R_{factor}, L_A) \quad (77)$$

missä kiehunnan pituus, terminen halkaisija ja rengasvirtauksen pituus ovat tuumina (in). Massavirran tiheys on yksikössä $10^6 \text{ lb}/(\text{h ft}^2)$ ja paine yksikössä psia. R-tekijä ja kriittinen höyrypitoisuus ovat dimensiottomia. Kiehunnan pituudella L_B tarkoitetaan matkaa kokonaiskiehunnan alusta tutkittavan lämmönsiirtokriisin alkun. Terminen halkaisija D_Q on

$$D_Q = \frac{4A}{P_{rods}} \quad (78)$$

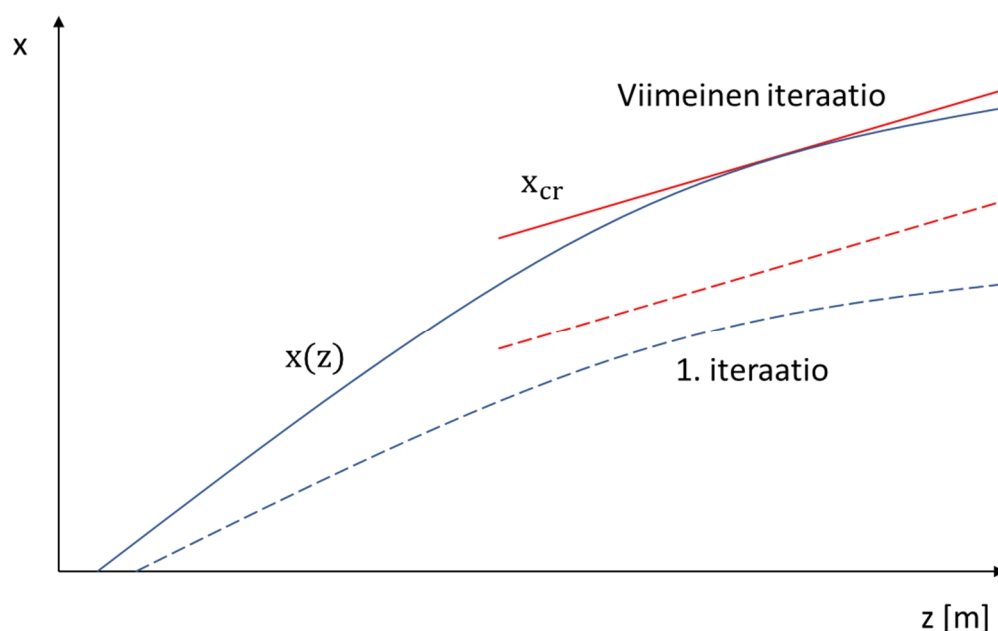
missä A on aktiivivirtauksen, polttoainesauvoille menevän virtauksen, virtauspinta-ala ja P_{rods} on polttoainesauvojen ja vesisauvojen kokonaispiiri. (GEXL17 2007, s. 1 ja 3)

Höyrypitoisuus virtauskanavan kohdassa z puolestaan on

$$x(z) = \frac{\frac{Q(z)}{W} - (h_{ls} - h_{in})}{h_{lg}} \quad (79)$$

missä $x(z)$ höyrypitoisuus virtauskanavan kohdassa z , z on virtauskanavan aksiaalinen koordinaatti, $Q(z)$ integroitu jäädytteen siirtyvä teho sisääntulosta ($z = 0$) kohtaan z , W jäädytevirtaus polttoaine-elementissä, h_{ls} kylläisen veden entalpia, h_{in} veden entalpia sisääntulossa ja h_{lg} veden höyrystymislämpö (GEXL17 2007, s. 9).

GEXL-korrelaatiossa polttoaine-elementin kriittinen teho määritetään kuvan 9 mukaisesti iteroimalla tehoa, kunnes paikallinen höyrypitoisuus saavuttaa kriittisen höyrypitoisuuden yhdessä laskentakopissa siten, että muualla paikallinen höyrypitoisuus on alle kriittisen höyrypitoisuuden (GEXL17 2007, s. 9). Kriittisen tehon avulla saadaan selville polttoaine-elementin CPR-arvo.



Kuva 9. Kriittisen tehon iterointiprosessi (perustuu lähteeseen GEXLI7 2007, s. 10).

4.5 Korroosiotuotteiden vaikutus lämmönsiirtoon

Korroosiotuotteiden kertyminen suojakuoren pinnalle vaikuttaa lämmönsiirtoon muun muassa kasvattamalla lämpövastusta, jolloin lämmönjohtuminen polttoainesauvasta jäähdytteeseen huononee. Tämän seurauksena suojakuoren lämpötila voi nousta. (Tong & Tang 1997, s. 268) Allen et al. mukaan crudin lämmönjohtavuus on kuitenkin yleensä parempi kuin oksidikerroksen, joten crud-kerros harvoin lisää suojakuoren lämpötilaa. (Allen et al. 2012, s. 59) Murтын mukaan puolestaan tiheä, tiukasti kiinnittynyt crud-kerros on usein ohut ja vaikuttaa vain vähän suojakuoren lämpötilaan. Heikosti kiinnittynyt kerros puolestaan on yleensä hyvin huokoinen ja sen huokosiin kertyy vettä, jolloin kerroksen lämmönjohtavuus on suuri. (Murty 2013, s. 213) Lisäksi Tongin ja Tangin mukaan huokoinen crud-kerros voi parantaa lämmönsiirtymistä, kun jäähydyte alkaa kiehua. Huokoinen crud imee itseensä vettä, joka höyrystyy ja kulkeutuu pois crudissa olevia kanavia pitkin. (Tong & Tang 1997, s. 268) Koska höyry pääsee kulkeutumaan nopeasti pois crudista, lämmönsiirtyminen tehostuu ja suojakuoren lämpötila alenee (Coyle et al. 2015, s. 34).

Korroosiotuotteiden kertyminen lisäksi kasvattaa polttoainesauvan suojakuoren pinnan karheutta. Kuplakiehuunassa pinnan karheus lisää kuplien ydintymispaikkoja ja siten parantaa lämmönsiirtymistä sileään pintaan verrattuna. (Akimoto et al. 2016, s. 317) Pinnan karheus voi kuitenkin kasvattaa nesteen kulkeutumista höyryfaasiin Janssenin tutkimuksen mukaan. Janssen et al. suorittivat kokeita lämmitetylle sauvalle, jonka pinta oli muokattu 300 mikrotuuman ($7,62 \mu\text{m}$) karheuteen. Kokeissa havaittiin, että CHF laski 35 % alhaisella virtauksella ja 50 % suuremmalla virtauksella. Selitykseksi tälle annettiin, että

karheus lisää nestekalvon pinnan epätasaisuutta ja siten nesteen kulkeutumista höyryfaasiin. (Tong & Tang 1997, s. 392) Kun nestettä kulkeutuu höyryfaasiin enemmän, neste-kerros suojakuoren pinnalta häviää nopeammin. Tällöin lämmönsiirtokriisi voi aikaistua.

Pinnan karheuden kasvu myös aiheuttaa suuremman kitkan, jolloin kitkapainehäviö polttoaine-elementissä kasvaa kitkapainehäviökaavan (62) tai (63) mukaisesti. Reaktorissa jokaisen polttoaine-elementin yli painehäviö on sama, jolloin karheuden kasvu voi vähentää polttoaine-elementille menevää jäähdytevirtausta (vrt. kaavat (62) ja (63)). Jäähdytevirtauksen vähentyessä lämmönsiirtyminen polttoaineesta jäähdytteeseen heikkenee ja polttoaineen lämmönsiirtokriisi voi aikaistua. Kitkapainehäviön kasvun vaikutusta lämmönsiirtokriisiin on arvioitu luvussa 6.

Artikkelin ”*can corrosion and CRUD actually improve safety margins in LWRs*” mukaan suojakuoren lämpötila voi nousta kymmeniä asteita crud-kerroksen aiheuttaman lämpövastuksen vuoksi. Tämä voi johtaa crudin aiheuttamaan paikalliseen korroosioon (CILC) ja vahingoittaa siten suojakuorta. Kutenkin, jos crudin paksuus on korkeintaan 10–20 μm , lämpövastus on mitätön ja crud voi jopa parantaa lämmönsiirtymistä. (Buongiorno 2014, s. 17) Lisäksi Macbethin sekä Cohenin ja Taylorin tutkimuksissa on havaittu, että kiehuksessa metallipinnan lämpötila voi olla alhaisempi, kun sen pinnalla on ohut ($< 0,1 \text{ mm}$) magnetiittikerros (Fe_3O_4) verrattuna siihen, että pinta olisi sileä (katso Kakaç et al. 1988, s. 535). IAEA:n (International Atomic Energy Agency) raportissa ”*Corrosion of zirconium alloys in nuclear power plants*” kerrotaan myös, että huokoinen magnetiittikerros simuloituilla polttoainesauvoilla ei aiheuta suurta kasvua suojakuoren lämpötilassa. Laboratoriotesteissä havaittiin, että magnetiittikerroksen ollessa alle 100 μm , suojakuoren lämpötila muuttui alle 10 °C kiehutusvesireaktorin olosuhteissa, kun lämpövuoto oli 100 W cm^{-2} . (Corrosion 1993, s. 110) Glasstonen ja Sesonsken mukaan tyypilliselle kiehutusvesireaktorille lämpövuoto on noin 50 W cm^{-2} (Glasstone&Sesonske 1994, s. 583).

Macbet havaitsi tutkimuksessaan 5–10 % laskun sallitussa lämpövuossa, kun pinnan, jossa oli 100 μm magnetiittikerros, tuloksia verrattiin sileän pinnan tuloksiin 69 baarin paineessa. Tutkimuksessa käytettiin rengasmaista virtauskanavaa (engl. annular test section), jonka sisähalkaisija oli 15,87 mm ja ulkohalkaisija 22,73 mm ja jonka pinnalle oli tehty 5–150 μm paksu magnetiittikerros. (katso Kakaç et al. 1988, s. 536)

Cinosi ja Walker tutkivat, miten crud-kerros vaikuttaa polttoaineen jäähdytteen massavirtaan, polttoainesauvan lämpötilaan ja kriittiseen lämpövuohon painevesilaitoksella. Tutkimus tehtiin CFD-laskennan (Computational Fluid Dynamics) avulla. Laskennassa käytettiin polttoainenippua, jossa oli crudia vain osittain. Tutkimuksessa havaittiin, että crud-kerroksen aiheuttama karhea pinta kasvattaa paikallista turbulenssia, jolloin paikallinen lämmönsiirtokerroin kasvaa ja polttoainesauvan lämpötila laskee crudia sisältävässä kohdassa. Crudia sisältävän kohdan jälkeen kuitenkin lämpötila kasvoi ja lämmönsiirtokerroin pieneni verrattuna polttoainesauvaan, jonka pinta on sileä. (Cinosi & Walker 2016, s. 28, 35–37)

Coyle et al. tutkivat syntetisoidun crud-kerroksen paksuuden sekä crudissa olevien kanavien, niiden halkaisijan ja etäisyyksien vaikutusta lämmönsiirtymiseen. Syntetisoitu crud valmistettiin ITO-lämmittimelle (indiumtinaoksidi) piidioksidista siten, että se vastasi läheisesti reaktorissa olevan crudin merkittäviä ominaisuuksia, kuten karheutta ja huokoisuutta. Tulokseksi saatiin, että ilman crudissa olevia kanavia, lämmönsiirtokerroin oli hieman suurempi kuin kanavien kanssa. Suuremmalla kanavan halkaisijalla lämmönsiirtokerroin oli myös hieman suurempi kuin pienemmällä halkaisijalla. Kanavien eri etäisyydet toisistaan eivät juurikaan muuttaneet lämmönsiirtokerrointa. Crudin paksuuden kasvaessa lämmönsiirtokerroin puolestaan kasvoi. Ilman crud-kerrosta lämmönsiirtokerroin oli suurempi. (Coyle et al. 2015, s. 39, 85–94)

Eristämisen, kuplien ydintymispaikkojen kasvun, vesipisaroiden kulkeutumisen lisääntyminen höyryfaasiin ja kitkapainehäviön kasvun lisäksi korroosiotuotteet voivat vaikuttaa lämmönsiirtokorrelaatioihin. Monet lämmönsiirtokorrelaatiot on annettu sileälle pinnalle, mutta korroosiotuotteiden vuoksi pinnasta tulee karhea, mikä voi muuttaa korrelaatioiden luotettavuutta. Esimerkiksi konvektiivisessa lämmönsiirrossa voidaan Dittus-Boelterin korrelaation 24 sijaan käyttää esimerkiksi Gnielinskin korrelaatiota, joka on seuraavanlainen

$$\text{Nu} = \frac{\left(\frac{f_D}{8}\right)(\text{Re} - 1000)\text{Pr}}{1 + 12,7\left(\frac{f_D}{8}\right)^{0,5}\left(\text{Pr}^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \quad (80)$$

Gnielinskin korrelaatio pätee, kun $0,5 \lesssim \text{Pr} \lesssim 2000$ ja $3000 \lesssim \text{Re} \lesssim 5 \times 10^6$. (Incropera et al. 2006, s. 515) Darcyn kitkakerroin f_D saa karhealle pinnalle esimerkiksi Colebrookin yhtälöllä (74) tai Moodyn käyrästä (ks. luku 4.3).

Chisholm puolestaan tutki putken karheuden vaikutusta kaksifaasivirtauksen kitkapainehäviöön ja kehitti kaavan, jolla sileän putken kaava (64) voidaan ekstrapoloida karhealle putkelle. Kaava on seuraavanlainen

$$\frac{B_R}{B_S} = \left\{ 0,5 \left[1 + \left(\frac{\mu_g}{\mu_l}\right)^2 + 10^{-600 \frac{\varepsilon}{d}} \right] \right\}^{\frac{0,25-n}{0,25}} \quad (81)$$

missä ε on putken karheus, d on putken halkaisija, B_R on B karhealle putkelle ja B_S on B sileälle putkelle. (Awad & Muzychka 2005, s. 4)

5. TUTKIMUSMENETELMÄT JA AINEISTO

5.1 Ongelman asettelu, työvaiheet ja lähtöoletukset

Tämän työn laskentaosuudessa tavoitteena oli tutkia, miten polttoainesauvojen pinnan karheuden kasvu korroosiotuotteiden kertymisen vuoksi muuttaa polttoaineen ajautumista lämmönsiirtokriisiin OL1- ja OL2-laitosyksiköillä. Lämmönsiirtokriisiä kuvaavana suurena käytettiin CPR-arvoa, jonka määritelmä on kerrottu luvussa 4.4. Laskennassa ei huomioitu DNB-ilmiötä, sillä OL1- ja OL2-laitoksilla lineaariteho, jolla DNB-ilmiö esiintyisi, on polttoaineille asetettua lineaaritehorajaa (TMOL, Thermal Mechanical Operating Limit) selvästi suurempi.

OL1- ja OL2-laitoksilla CPR-arvojen laskeminen perustuu polttoainetoimittajien toimitamiin korrelaatioihin, jotka puolestaan on määritelty kokeellisiin tuloksiin perustuen. Luvussa 4.4 esitelty GEXL-korrelaatio on esimerkki eräästä kokeellisiin tuloksiin perustuvasta korrelaatiosta. OL1:n ja OL2:n jokaiselle käyttöjaksolle määritetään pienin sallittu CPR-arvo (OLMCPR, Operating Limit Minimum CPR) transienttiallysein. Pienin sallittu CPR-arvo riippuu polttoainetyypistä ja pääkiertovirtauksen määrästä. (Tammela 2017, s. 1) Pääkiertovirtauksella tarkoitetaan reaktoripaineastian sisäistä vesikiertoa, jota ylläpidetään pääkiertopumpuilla (OL1&OL2 2013, s. 24). OLMCPR-arvon määrittämisessä otetaan huomioon Säteilyturvakeskuksen YVL-ohjeen B.4 vaatimukset. Ohjeessa (YVL B.4 2013, s. 6) edellytetään muun muassa, että

- Odotettavissa olevissa käyttöhäiriöissä lämmönsiirtokriisiin joutuvien polttoainesauvojen lukumäärä ei ylitä 0,1 %:a reaktorissa olevien sauvojen kokonaismäärästä.
- Luokan 1 oletetuissa onnettomuuksissa lämmönsiirtokriisiin joutuvien polttoainesauvojen määrä ei ylitä 1 %:a reaktorissa olevien sauvojen kokonaismäärästä.

OLMCPR-arvon määrittämisessä käytetään kolmea transienttia (Paaajanen 2017, s. 4):

- 1. Ulkoisen sähköverkon menetys ja omakäytölle siirtyminen epäonnistuu.
- 2. Sama kuin transientti 1, mutta ilman osittaista pikasulkua.
- 3. Kaikkien neljän 413 turbiinin ohjausventtiilin tahaton sulkeutuminen.

Transientissa 1 vaatimuksena on, että lämmönsiirtokriisiin joutuvien polttoainesauvojen lukumäärä ei saa ylittää 0,1 %:a reaktorissa olevien sauvojen kokonaismäärästä. Transienteissa 3 ja 2 vaatimuksena on, että lämmönsiirtokriisiin joutuvien polttoainesauvojen lukumäärä ei saa ylittää 1 %:a reaktorissa olevien sauvojen kokonaismäärästä. (Paaajanen 2017, s. 4–5)

Polttoaineen käytönsuunnittelussa otetaan huomioon pienin sallittu CPR-arvo. Polttoaineiden CPR-arvot voivat kuitenkin muuttua korroosiotuotteiden vuoksi. Kuten jo luvussa 4.5 kerrottiin, korroosiotuotteiden kertyminen polttoainesauvan pintaan kasvattaa sauvan pinnan karheutta. Karheampi pinta aiheuttaa virtaukselle suuremman kitkan, jolloin virtauksen painehäviö kasvaa kitkapainehäviökaavan (62) tai (63) mukaisesti. Jotta jokaisen polttoaine-elementin yli painehäviö olisi sama, karheuden kasvu voi pienentää polttoainesauvoille menevää jäähdytevirtausta. Jos jäähdytteen virtaus polttoaineeseen vähenee merkittävästi, polttoaineen CPR-arvo voi laskea. Toisaalta, koska pääkiertovirtaus pysyy samana, jäähdytevirtauksen väheneminen joillakin polttoaine-elementeillä voi kasvattaa muiden polttoaine-elementtien jäähdytevirtausta. Tällöin on mahdollista, että näiden polttoaine-elementtien CPR-arvo kasvaa. Tämän lisäksi jäähdytevirtauksen väheneminen voi kasvattaa ohivirtausta eli virtausta, joka ei mene polttoainesauvoille.

Oksidikerros kasvaa suojakuoressa sisäänpäin, joten oksidikerroksen ulkopinnan karheuden oletettiin pysyvän vakiona oksidikerroksen paksuuden kasvaessa. Crudia puolestaan kertyy oksidikerroksen päälle, joten sen ulkopinnan karheuden oletettiin muuttuvan kertyneen crudin määrän kasvaessa. Crudin määrä riippuu vesikemiasta sekä polttoaineen säteilyajasta ja -historiasta (Michelsson & Leskelä 2017, s. 17). Reaktorissa on eri ikäisiä polttoaine-elementtejä, joten niiden polttoainesauvojen karheudet näin ollen poikkeavat toisistaan eri crudin määrän vuoksi.

Laskennassa tehtiin seuraavat työvaiheet:

1. Määritettiin SIMULATE-3-sydänlaskentaohjelmalle syötettäville aktiivivirtauksen yksifaasikitkakertoimien lisäkertoimille maksimi-arvot eri polttoainesauvan pinnankarheuksille. (ks. luku 5.2)
2. Jaettiin polttoaine-elementit ikäluokkiin palaman mukaan. (ks. luku 5.3)
3. Arvioitiin polttoainesauvojen maksimipinnankarheus korroosiotuotteiden kertymisen vuoksi. (menetelmä luvussa 5.4, tulokset luvussa 6.1)
4. Tarkasteltiin karheuden vaikutusta CPR-arvoihin ja aktiivivirtaukseen yleisellä tasolla:
 - a. Tarkasteltiin CPR-arvojen ja aktiivivirtauksien muuttumista, kun eri ikäisten polttoaine-elementtien kitkakertoimia kasvatettiin ikäryhmä kerrallaan olettaen muut polttoaine-elementit sileiksi.
 - b. Tarkasteltiin CPR-arvojen ja aktiivivirtauksien muutoksia, kun kitkakertoimia kasvatettiin yksittäisille polttoaine-elementeille sekä kaikille polttoaine-elementeille.
 - c. Tutkittiin voiko ohivirtaus muuttua korroosiotuotteiden vuoksi.
 - d. Selvitettiin, voiko jakson pienimmän CPR-arvon paikka muuttua reaktorissa.
5. Arvioitiin karheuden vaikutusta koko reaktorin pienimpään CPR-arvoon.
6. Selvitettiin karheuden kasvun aiheuttama maksimivaikutus CPR-arvon ja reaktorin MCPR-arvon laskuun.
7. Määritettiin eri ikäryhmien CPR-arvojen ja reaktorin pienimmän CPR-arvon suurin lasku, kun polttoainesauvan karheus muuttuu ajan funktiona.

Polttoainesauvojen pinnan karheuden vaikutuksen selvittämiseksi simuloinneissa kasvatettiin polttoainesauvoille menevän virtauksen yksifaasikitkakertoimia ja tutkittiin, miten tämä vaikutti polttoaineiden CPR-arvoihin ja aktiivivirtauksiin. Laskennassa ensin tarkasteltiin CPR-arvojen ja aktiivivirtauksien muuttumista, kun eri ikäisten polttoaine-elementtien kitkakertoimia kasvatettiin ikäryhmä kerrallaan olettaen muut polttoaine-elementit sileiksi. Lisäksi tarkasteltiin muutoksia, kun kitkakertomia kasvatettiin yksittäisille polttoaine-elementeille sekä kaikille polttoaine-elementeille. Tällöin saatiin selville, miten karheus ylipäättään vaikuttaa CPR-arvoihin sekä aktiivivirtauksiin. Lisäksi tarkasteltiin, voiko ohivirtaus muuttua karheuden vuoksi sekä voiko jakson pienimmän CPR-arvon paikka reaktorissa muuttua. Luvussa 5.2 on esitetty, miten kitkakertoimet on määritetty laskennassa käytetylle sydänlaskentaohjelmalle. Luvussa 5.3 puolestaan on kerrottu, miten polttoaine-elementit jaettiin eri ikäryhmiin.

Karheuden kasvu joillain polttoaine-elementeillä ei välttämättä vielä vaikuta reaktorin rajoittavimpaan eli pienimpään CPR-arvoon (MCPR, Minimum Critical Power Ratio). Tämän vuoksi laskennassa tarkasteltiin yksittäisten polttoaine-elementtien CPR-arvojen lisäksi koko reaktorin MCPR-arvoa. Jotta karheuden kasvun aiheuttama maksimivaikutus CPR-arvon ja reaktorin MCPR-arvon laskuun saataisiin selville, määritettiin CPR-arvon ja reaktorin MCPR-arvon suurin lasku, kun polttoaine-elementtien kitkakertoimia kasvatettiin ikäryhmä kerrallaan vastaamaan määritettyä maksimikarheutta (ks. luku 6.1) ja oletettiin muut polttoaine-elementit sileiksi. Lisäksi arvioitiin CPR-arvon suurin lasku, kun yksittäisille polttoaine-elementeille annettiin niiden maksimikarheus.

Laskennassa myös määritettiin eri ikäryhmien CPR-arvojen ja reaktorin pienimmän CPR-arvon muutokset, kun polttoainesauvan karheus muuttuu ajan funktiona. Tällöin saatiin selville, kuinka paljon arvot todellisuudessa voisivat laskea. Todellista karheuden kasvun funktiota ei saatu selville, joten karheudelle määritettiin maksimiarvo (ks. luku 6.1) sekä annettiin kasvulle erilaisia funktioita. Laskenta suoritettiin OL1 laitoksen 39. käyttöjaksolle (OL1c39, 2017–2018) ja OL2 laitoksen 37. käyttöjaksolle (OL2c37, 2017–2018). Laskennassa käytettiin näiden jaksojen alkuperäistä lataussuunnitelmaa. Laskennassa ajopisteiksi valittiin täysi teho (teho 2500 MW, pääkiertovirtaus 7650 kg/s) ja kaksi CPR-arvojen kannalta rajoittavinta osatehopistettä (1900 MW, 4600 kg/s sekä OL1:lle 1775 MW, 4000 kg/s ja OL2:lle 1750 MW, 4000 kg/s). Laskennassa tehtiin seuraavia yksinkertaistuksia:

- Polttoaine-elementissä jäähdytteen virtaus on täysin kehittynyt ja kitkakerroin on vakio koko virtauskanavan matkalla.
- Crudia kertyy polttoainesauvan pinnalle tasaisesti ja polttoainesauvalla on sama karheus koko sen pituudella.
- Vain polttoainesauvojen karheuden kasvu otetaan huomioon. Esimerkiksi vesisauvojen ja välitukien karheuden kasvua ei oteta huomioon.

5.2 Kitkakertoimen määrittäminen SIMULATE-3-ohjelmalle

Tässä työssä CPR-arvojen laskennassa käytettiin Studsvik Scandpowerin SIMULATE-3-sydänlaskentaohjelmaa. SIMULATE-3 on kolmiulotteinen stationääritilan sydänlaskentaohjelma, jota käytetään reaktorisydämen mallintamisessa (Cronin et al. 1995a, s. 1). OL1- ja OL2-laitosyksiköillä reaktorisydämen mallinnuksessa jokainen polttoaine-elementti on jaettu aksiaalisuunnassa 25 laskentakoppiin, noodiin, sillä olosuhteet ja polttoaine-elementtien ominaisuudet muuttuvat merkittävästi liikuttaessa aksiaalisuunnassa. Noodin poikkileikkaus on neliö. Jokaisen noodin korkeus on 14,72 cm ja leveys 15,375 cm. (Hämäläinen 2005, s. 24)

SIMULATE-3-ohjelman laskenta perustuu neutroniikka- ja termohydrauliikkamalliin. SIMULATE-3-ohjelman termohydrauliikkalaskuissa polttoaineeseen menevä virtaus (kanavavirtaus) iteroidaan vaatimalla, että kanavavirtauksien ja ohivirtauksien summa vastaa syötettyä pääkiertovirtausta. Lisäksi painehäviön tulee olla sama jokaisen polttoaine-elementin yli. (Cronin et al. 1995b, s. 1 ja 5)

SIMULATE-3-ohjelmassa kitkapainehäviö polttoaine-elementin yli vastaa teoriassa esitettyä kaavaa (63). Merkitään SIMULATE-3:n polttoainesauvoille menevän virtauksen kitkakerrointa merkillä f_{SIM} . Kitkakerroin f_{SIM} on yksifaasikitkakerroin ja se on määritetty sileälle pinnalle seuraavasti

$$f_{SIM} = aRe^b \quad (82)$$

missä Re on Reynoldsin luku vedelle sekä a ja b vakioita. Yhtälö (82) vastaa aiemmin esitettyä kaavaa (52). Vakioiden a ja b oletusarvot ovat 0,2 ja -0,2. (Covington 2002, s. 42–43) Vakioita a ja b on kuitenkin kalibroitu, jotta SIMULATE-3-ohjelman hydrauliikkalaskut vastaisivat paremmin polttoainetoimittajien termohydraulisia laskuja. Eri polttoainetyypeille on määritetty omat a ja b arvot. (Hynönen 2011, s. 1) Tässä työssä käytettiin kalibroituja a ja b arvoja.

SIMULATE-3-ohjelmassa yksifaasikitkakertoimelle voidaan määrittää lisäkerroin (Covington 2002, s. 38). Kaava (82) voidaan siis ilmaista myös seuraavasti

$$f_{SIM} = aRe^b \times \text{lisäkerroin} \quad (83)$$

Lisäkertoimen avulla voidaan sileän pinnan kitkakertoimen arvoa kasvattaa, joten määrittämällä lisäkertoimen arvo, voidaan suojakuoren korroosiotuotteiden aiheuttama kitkapainehäviön nousu ottaa huomioon.

Työssä lisäkertoimen määrittämiseksi käytettiin Colebrookin yhtälöä (74), sillä sen avulla kitkakerroin voidaan määrittää karhealle pinnalle. Yksifaasikitkakertoimen arvoa ei kuitenkaan kasvatettu lisäkertoimen avulla vastaamaan Colebrookin yhtälöstä saatavaa karhean pinnan arvoa. Jos näin olisi tehty, olisi kitkakerrointa pitänyt kasvattaa, vaikka pinta

olisi sileä. Tämän vuoksi tässä työssä Colebrookin yhtälö kalibroitiin vastaamaan SIMULATE-3-ohjelman kitkakerrointa, kun pinta on sileä. Yksifaasikitkakerrointa kasvatettiin sitten lisäkertoimen avulla vastaamaan kalibroidusta Colebrookin yhtälöstä saatavaa karheen pinnan arvoa.

Jotta Colebrookin yhtälöstä saatava kitkakertoimen arvo vastaisi SIMULATE-3-ohjelman kitkakerrointa sileälle pinnalle, kalibroidaan Colebrookin yhtälö laittamalla kitkakertoimen eteen kerroin x .

$$\frac{1}{\sqrt{x f_{D,kalibroitu}}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7d} + \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{x f_{D,kalibroitu}}} \right) \quad (84)$$

$$\Leftrightarrow f_D = x f_{D,kalibroitu} \quad (85)$$

$$\Leftrightarrow f_{D,kalibroitu} = \frac{f_D}{x} \quad (86)$$

Merkitään Colebrookin yhtälön kalibroitu kitkakerroin ja SIMULATE-3-ohjelman kitkakerroin samoiksi sileälle pinnalle ($\varepsilon = 0$):

$$f_{D,kalibroitu}(\varepsilon = 0) = f_{SIM} = a \text{Re}^b \quad (87)$$

Kun kaavat (86) ja (87) yhdistetään, saadaan

$$\frac{f_D(\varepsilon = 0)}{x} = a \text{Re}^b \quad (88)$$

$$\Leftrightarrow x = \frac{f_D(\varepsilon = 0)}{a \text{Re}^b} \quad (89)$$

Sijoittamalla x kaavaan (86) saadaan,

$$f_{D,kalibroitu} = \frac{f_D a \text{Re}^b}{f_D(\varepsilon = 0)} \quad (90)$$

Kitkakerroin f_{SIM} saadaan vastaamaan kalibroitua Colebrookin kitkakerrointa $f_{D,kalibroitu}$ seuraavalla lisäkertoimella

$$\text{lisäkerroin} = \frac{f_{D,kalibroitu}}{a \text{Re}^b} = \frac{f_D a \text{Re}^b}{f_D(\varepsilon = 0) a \text{Re}^b} = \frac{f_D}{f_D(\varepsilon = 0)} \quad (91)$$

Kaavan (91) mukaisesti polttoainesauvan pinnan karheuden kasvaessa SIMULATE-3:n kitkakerrointa f_{SIM} voidaan kasvattaa samassa suhteessa Colebrookin yhtälön kitkakertoimen kanssa. Kaavan (91) lisäkertoimen määrittämiseksi määritetään ensin Reynoldsin luvulle arvo. Reynoldsin luku saadaan kaavalla (19). Reynoldsin luku määritetään veden

yksifaasivirtaukselle, sillä kaksifaasisuus huomioidaan kitkapainehäviön kaavassa kaksifaasikertoimella ϕ_{lo}^2 (ks. kaava (63)). TVO:lla kaksifaasikertoimena käytetään Martini-Nelsonin korrelaatiota (Hynönen 2011, s. 2). Reynoldsin luvun ratkaisemiseksi tarvitaan tietoa polttoaineen hydraulisesta halkaisijasta sekä veden tiheydestä, dynaamisesta viskositeetista ja virtausnopeudesta.

Polttoaineen hydraulinen halkaisija on noin 0,01 m. Veden tiheys ja dynaaminen viskositeetti voidaan ratkaista paineen ja lämpötilan avulla. OL1- ja OL2-laitosyksiköiden reaktorin käyttöpainne on 70 baaria ja jäähdytteen keskimääräinen lämpötila polttoaineessa luokkaa 283 °C. Näiden avulla veden tiheydeksi saadaan noin 745 kg/m³ ja dynaamiseksi viskositeetiksi 9,24×10⁻⁵ Ns/m² (XSteam Excel versio 2.6) Veden virtausnopeus puolestaan saadaan seuraavalla kaavalla

$$u_l = \frac{\dot{m}_l}{A\rho_l} \quad (92)$$

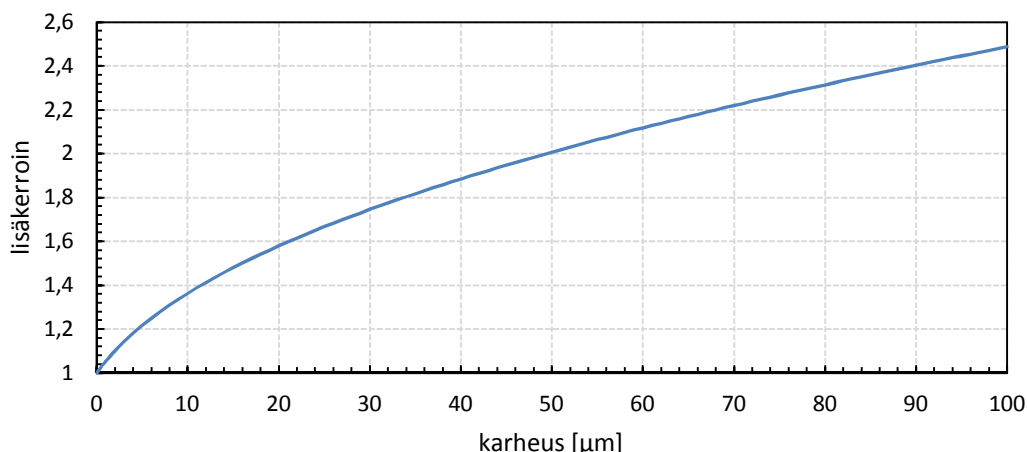
missä \dot{m}_l on veden massavirta, ρ_l veden tiheys ja A virtauskanavan poikkipinta-ala. Polttoaine-elementin virtauskanavan poikkipinta-ala on noin 0,01 m² (Ranta-Puska & Knuutila 2014, s. 20). Veden massavirran puolestaan oletetaan olevan maksimissaan 20 kg/s. Tällöin saadaan veden maksimi virtausnopeudeksi

$$u_{l,max} = \frac{20 \text{ kg/s}}{0,01 \text{ m}^2 \times 745 \text{ kg/m}^3} = 2,68 \text{ m/s} \quad (93)$$

Maksimi Reynoldsin luku on tällöin

$$\text{Re}_{max} = \frac{0,01 \times 2,68 \text{ m/s} \times 745 \text{ kg/m}^3}{9,24 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}^2} = 2,2 \times 10^5 \quad (94)$$

Käytetään lisäkertoimen määrittämiseksi Colebrookin yhtälön kaavassa halkaisijana polttoaineen hydraulista halkaisijaa 0,01 m ja määritettyä Reynoldsin luvun maksimiarvoa 2,2×10⁵. Tällöin saadaan kitkakertoimen määrittämiseksi maksimi lisäkertoimen arvo kaavalla (91) eri polttoainesauvojen karheuksille. Kuvassa 10 on esitetty lisäkertoimen arvo eri karheuksilla, kun Reynoldsin luku on 2,2×10⁵.



Kuva 10. Lisäkertoimen arvo eri karheuksille, kun Reynoldsin luku on $2,2 \times 10^5$.

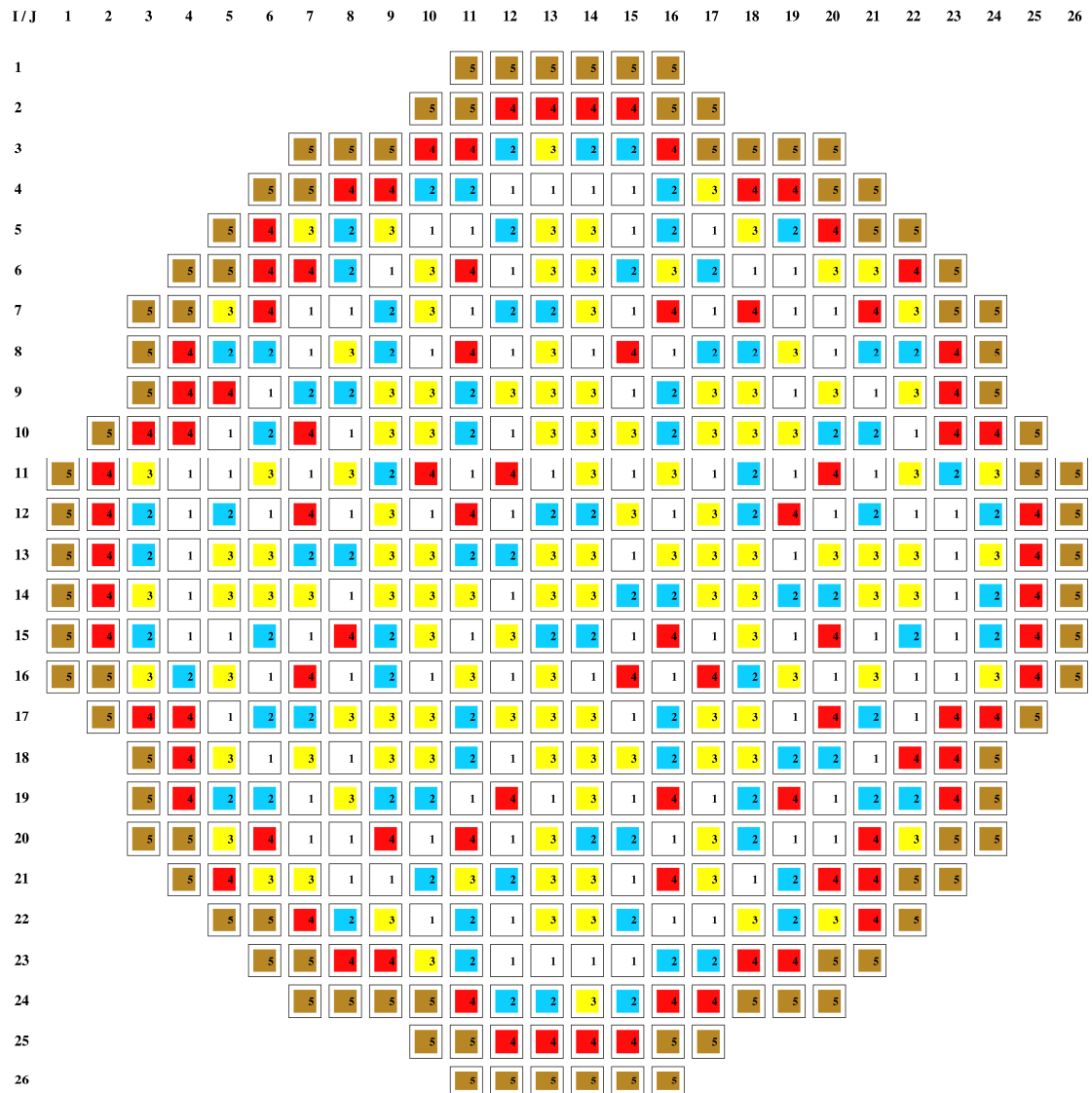
5.3 Polttoaineiden ryhmittely ikäluokkiin

SIMULATE-3-ohjelmassa lisäkertoimia voidaan antaa polttoaineille ryhmäkohtaisesti, jolloin eri polttoaine-elementeille voidaan antaa eri lisäkertoimet (Covington 2002, s. 38). Koska crudin määrä ja siten luultavasti myös polttoainesauvan pinnankarheus riippuu polttoaineen iästä ja palamasta, jaettiin polttoaine-elementit ryhmiin iän ja palaman mukaan. Taulukossa 3 on esitetty, mikä palama eri ikäisillä polttoaine-elementeillä on suurin piirtein käyttöjakson alussa, sekä palamaa ja ikää vastaava ryhmän numero.

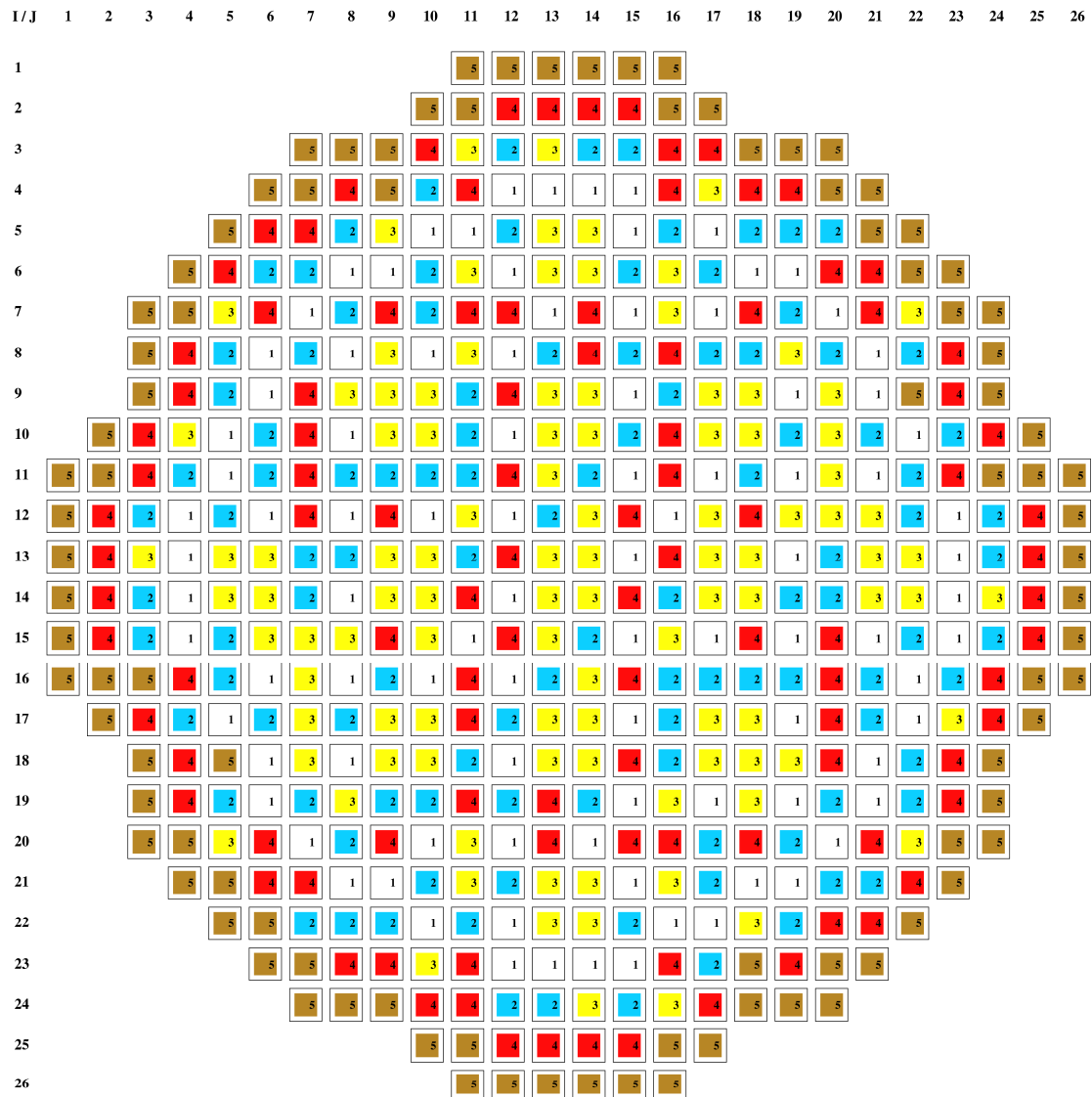
Taulukko 3. Polttoaine-elementtien ryhmä, ryhmää vastaava ikä käyttöjakson aikana ja palama käyttöjakson alussa suurin piirtein.

Ryhmä	Ikä vuosissa	Palama käyttöjakson alussa [MWd/kgU]
1	0–1	$x < 10$
2	1–2	$10 \leq x < 20$
3	2–3	$20 \leq x < 30$
4	3–4	$30 \leq x < 40$
5	4–6	$x \geq 40$

SIMULATE-3-ohjelman tulosteesta saatiin selville reaktorin eri polttoaine-elementtien palamat käyttöjakson alussa. Palamien avulla jaettiin reaktorin eri polttoaine-elementit taulukon 3 mukaisesti ryhmiin. Kuvassa 11 on esitetty OL1c39:n ryhmäkarta ja kuvassa 12 OL2c37:n ryhmäkarta. Kuvissa yksi neliö kuvaa yhtä polttoaine-elementtiä.



Kuva 11. OL1 39. käyttöjakson polttoaine-elementtien jako taulukon 3 mukaisiin ryhmiin. Värät: ryhmä 1 valkoinen, ryhmä 2 sininen, ryhmä 3 keltainen, ryhmä 4 punainen ja ryhmä 5 ruskea.



Kuva 12. OL2 37. käyttöjakson polttoaine-elementtien jako taulukon 3 mukaisiin ryhmiin. Värät: ryhmä 1 valkoinen, ryhmä 2 sininen, ryhmä 3 keltainen, ryhmä 4 punainen ja ryhmä 5 ruskea.

5.4 Polttoainesauvojen pinnankarheus

Suojakuoren oksidikerroksen karheus on tyypillisesti alle 0,5 μm (Buongiorno 2014, s. 16). Koska oksidikerros kasvaa suojakuoreessa sisäänpäin, ulkopinnan karheuden oletetaan pysyvän samana oksidikerroksen paksuuden kasvaessa. Artikkelin ”*can corrosion and CRUD actually improve safety margins in LWRs?*” mukaan crudin karheus puolestaan on tyypillisesti noin 2,5 μm ja suojakuoren ulkopinnan keskimääräinen karheus käytön aikana 0,5–3,0 μm (Buongiorno 2014, s. 17–18). Artikkelissa ”*CFD analysis of localized crud effects on the flow of coolant in nuclear rod bundles*” kuitenkin crudin pinnan epätasaisuuksien korkeuksien arvioitiin saavuttavan jopa 20 μm (Cinisi & Walker 2016, s. 30). Jotta crudin karheudesta saataisiin parempi selvyys, tutkittiin polttoainesauvan poikkileikkauksista crudin pinnankarheutta.

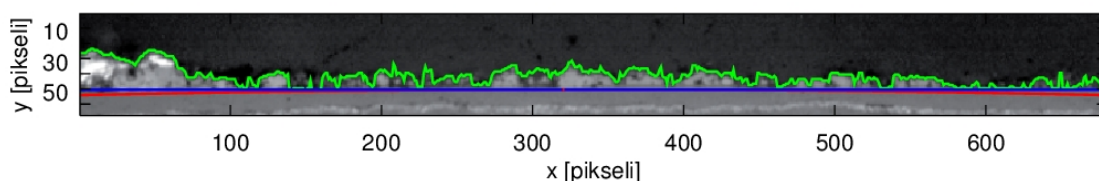
Liitteessä A on esitetty erään 5 käyttöjaksoa reaktorissa olleen polttoaine-elementin yhdestä polttoainesauvasta korkeuksilta 2795 mm ja 1430 mm otettuja poikkileikkauskuvia. Samalta korkeudelta on kuvat neljästä kulmasta (0° , 90° , 180° ja 270°). Poikkileikkauskuvissa polttoainesauva näkyy valkoisena. Polttoainesauvan ulkopinnalla on nähtävissä harmaa oksidikerros ja sen pinnalla crudia. Jotta poikkileikkauskuvista saataisiin pinnan karheus selville, piirrettiin crudin pintaan vektori. Tässä työssä tämä vektorin piirto tehtiin muuttamalla kuvien tausta ensin mustaksi kuvankäsittelyohjelmalla. Tämän jälkeen muokattu kuva syötettiin GNU Octave -laskentaohjelmalle, jossa kuva muutettiin liukulukumatriisiksi. Liukulukumatriisissa mustat pikselit ovat nollia, joten pinnan paikka saatiin selville etsimällä matriisista jokaisen sarakkeen alin nolla. Näiden kohtien avulla saatiin piirrettyä crudin pintaan vektori. Poikkileikkauskuvista tausta ei erottunut selkeästi crudin pinnasta, joten samalle kuvalle piirrettiin neljä eri vektoria eri karheusarvojen saamiseksi vaihtamalla poikkileikkauskuvan taustan valinnan raja-arvoa ennen taustan muuttamista mustaksi.

Piirretystä vektorista voidaan määrittää pinnan karheutta tutkimalla epätasaisuuksien poikkeamista keskilinjasta. Tässä työssä vektorista määritettiin karheudelle aritmeettinen ja neliöllinen keskiarvo. Koska polttoainesauvan pinta on kaareva, karheuden laskentaa helpotettiin piirtämällä ensin crud-kerrokselle korkeusprofiili. Tätä varten määritettiin kaarevan pinnan vektori oksidikerroksen ulkopinnalle. Karheus laskettiin myös olettaen sauvan pinta suoraksi. Tätä varten määritettiin oksidikerroksen ulkopinnalle suoran pinnan vektori kaarevan lisäksi. Oksidikerroksen tarkan ulkopinnan arvioiminen oli kuitenkin hankalaa ja sen pinta oli epätasainen muun muassa halkeamien vuoksi, joten suora ja kaareva pinta piirrettiin kohtaan, jossa crudin pinta oli alhaisimmillaan. Korkeusprofiili saatiin, kun crudin ulkopintaan piirretyn vektorin etäisyys määritettiin suorasta ja kaarevasta pinnasta. Korkeusprofiileista määritettiin pinnankarheudelle aritmeettiset ja neliölliset keskiarvot kaavojen (75) ja (76) mukaisesti sekä kaarevalle että suoralle pinnalle. Tulokset on esitetty luvussa 6.1.

6. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

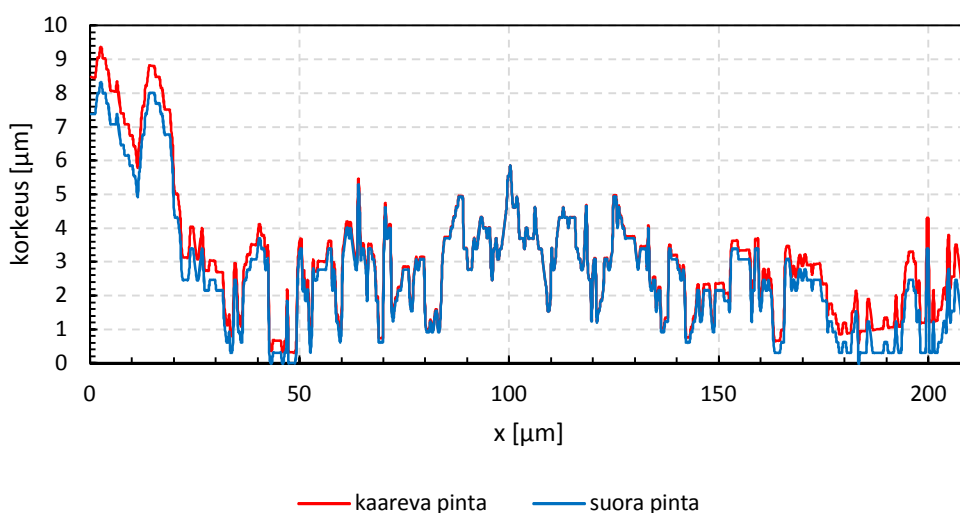
6.1 Polttoainesauvojen pinnankarheus

Polttoainesauvojen pinnankarheuden määrittämisessä piirrettiin ensin liitteen A poikkileikkauskuvien crudin ulkopintaan vektorit. Kuvassa 13 on esitetty esimerkki piirretystä vektorista. Vektori on esitetty vihreällä värillä.



Kuva 13. Polttoainesauvan poikkileikkaus korkeudelta 2795 mm kulmasta 0°. Crudin ulkopintaan piirretty vektori on esitetty vihreällä värillä. Kaareva oksidikerroksen ulkopinta on esitetty punaisella värillä ja suora oksidikerroksen ulkopinta sinisellä värillä.

Tämän jälkeen määritettiin crud-kerrokselle korkeusprofiili. Kuvassa 14 on esimerkki korkeusprofiilista kuvan 13 tapaukselle. Kuvassa 14 suora pinta on esitetty sinisellä ja kaareva pinta punaisella värillä.

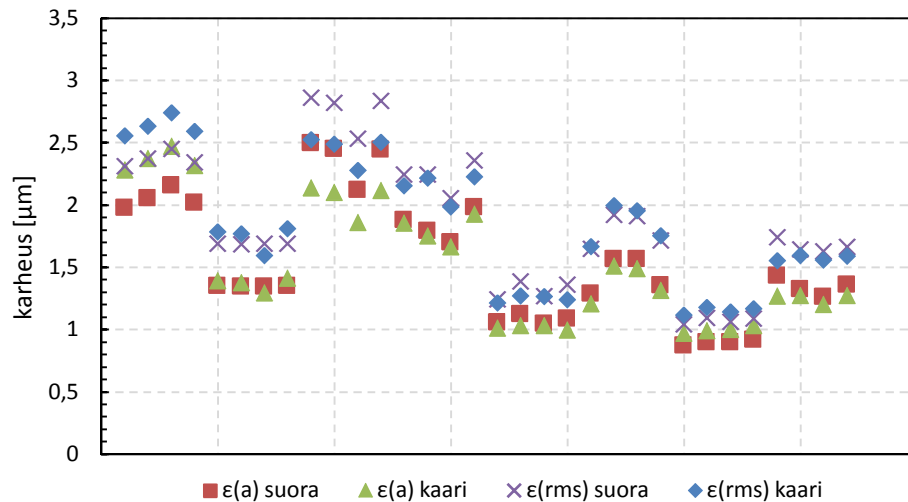


Kuva 14. Crud-kerroksen korkeusprofiili kuvan 13 tapaukselle.

Taulukossa 4 ja kuvassa 15 on esitetty pinnankarheudelle saadut arvot. Kuvassa 15 pinnankarheuden arvot on esitetty samassa järjestyksessä kuin taulukossa 4 eli arvot vasemmalta oikealle ovat samat kuin taulukossa 4 ylhäältä alas.

Taulukko 4. Pinnankarheuden aritmeettinen ja neliöllinen keskiarvo eri poikkileikkauskuvien suoralle ja kaarevalle oksidikerroksen pinnalle. Saman poikkileikkauskuvan eri crudin pinnan vektoreille on ilmoitettu omat pinnan-
karheusarvot.

		ϵ_a [μm]		ϵ_{rms} [μm]	
		Suora pinta	Kaareva pinta	Suora pinta	Kaareva pinta
Korkeus 2795 mm 0°	vektori 1	1,98	2,31	2,28	2,56
	vektori 2	2,06	2,38	2,38	2,64
	vektori 3	2,16	2,45	2,48	2,74
	vektori 4	2,02	2,35	2,32	2,59
Korkeus 2795 mm 90°	vektori 1	1,36	1,69	1,39	1,78
	vektori 2	1,35	1,69	1,38	1,77
	vektori 3	1,35	1,69	1,30	1,60
	vektori 4	1,35	1,70	1,41	1,81
Korkeus 2795 mm 180°	vektori 1	2,50	2,87	2,14	2,53
	vektori 2	2,45	2,82	2,10	2,49
	vektori 3	2,12	2,54	1,87	2,28
	vektori 4	2,45	2,84	2,12	2,5
Korkeus 2795 mm 270°	vektori 1	1,88	2,25	1,86	2,15
	vektori 2	1,80	2,25	1,75	2,22
	vektori 3	1,70	2,06	1,67	1,98
	vektori 4	1,98	2,36	1,93	2,23
Korkeus 1430 mm 0°	vektori 1	1,06	1,25	1,01	1,22
	vektori 2	1,13	1,39	1,04	1,27
	vektori 3	1,05	1,27	1,04	1,26
	vektori 4	1,09	1,36	1,00	1,24
Korkeus 1430 mm 95 90°	vektori 1	1,29	1,65	1,21	1,67
	vektori 2	1,57	1,92	1,51	2,00
	vektori 3	1,57	1,92	1,49	1,96
	vektori 4	1,36	1,72	1,32	1,75
Korkeus 1430 mm 180°	vektori 1	0,88	1,04	0,98	1,12
	vektori 2	0,90	1,10	0,99	1,18
	vektori 3	0,90	1,07	1,00	1,14
	vektori 4	0,92	1,09	1,03	1,17
Korkeus 1430 mm 270°	vektori 1	1,44	1,74	1,27	1,55
	vektori 2	1,33	1,65	1,28	1,6
	vektori 3	1,27	1,63	1,21	1,56
	vektori 4	1,36	1,67	1,28	1,59



Kuva 15. Pinnankarheuden aritmeettinen ja neliöllinen keskiarvo eri poikkileikkauskuvien suoralle ja kaarevalle oksidikerroksen pinnalle. Saman poikkileikkauskuvan eri crudin pinnan vektoreille on ilmoitettu omat pinnankarheusarvot.

Taulukosta 4 ja kuvasta 15 nähdään, että poikkileikkauskuvista saadut karheusarvot vaihtelevat noin 1–3 μm välillä. Näin ollen artikkelin ”*can corrosion and CRUD actually improve safety margins in LWRs?*” mukainen suojakuoren ulkopinnan karheus (0,5–3,0 μm) vaikuttaa validilta. Tämän perusteella CPR-arvon laskuissa oletettiin, että 1–6 vuotiailla polttoaine-elementeillä suojakuoren pinnankarheus on maksimissaan 3 μm . 0–1 vuotiailla polttoaine-elementeillä puolestaan oletettiin kertyneen crudia niin vähän, että pinnankarheus vastaa oksidikerroksen pinnankarheutta. Oksidikerroksen pinnankarheus on tyypillisesti alle 0,5 μm , mutta maksimikarheutena käytettiin arvoa 1 μm , mikä on konservatiivinen arvio.

Arvio 0–1 vuotiaiden polttoaine-elementtien crudin vähäisyydestä tehtiin sen perusteella, että vuonna 1997 yhden vuoden reaktorissa olleelle polttoainenipulle mitattiin crudin kertymäksi noin 1 g/m^2 . Vuonna 2005 OL1-laitoksella crud-kerroksen paksuuden arvioitiin olevan alle 5 μm kolme käyttöjaksoa reaktorissa olleilla kolmella polttoainenipulla. (Michelsson & Leskelä 2017, s. 18). Näille crudin kertymäksi saatiin 3,7; 3,6 ja 4,0 g/m^2 (Michelsson 2016, s. 5). Tämän perusteella 1 g/m^2 voitaisiin arvioida vastaavan maksimissaan 1 μm paksuutta. Lisäksi dokumenteissa ”*on the interaction between fuel crud and water chemistry in nuclear power plants*” ja ”*potential impacts of crud deposits on fuel rod behavior on high powered PWR fuel rods*” crudin tiheydeksi arvioitiin 1200 kg/m^3 , minkä perusteella 1 g/m^2 kertymä vastaisi 0,83 μm paksuutta (Chen 2000, s. 5; Wilson & Comstock 1999, s. 206).

6.2 Polttoainesauvojen karheuden vaikutus CPR-arvoihin ja aktiivivirtaukseen

6.2.1 Karheuden vaikutus yleisellä tasolla

Jotta polttoainesauvojen karheuden vaikutuksesta polttoaineiden CPR-arvoihin ja aktiivivirtaukseen saataisiin parempi käsitys, tarkasteltiin karheuden vaikutusta yleisesti. Kun eri ikäluokkien ja yksittäisten polttoaine-elementtien karheutta kasvatettiin ja oletettiin muut sileiksi, huomattiin, että karheilla aktiivivirtaus sekä CPR-arvot laskivat. Esimerkiksi, kun annettiin 0–1 vuotiaille karheutta ja oletettiin muut sileiksi, CPR-arvo laski 0–1 vuotiaille. Osalla sileiksi oletetuilla polttoaine-elementeillä puolestaan aktiivivirtaus ja CPR-arvot saattoivat kasvaa. Joissakin tapauksissa osalla sileiksi oletetuilla polttoaine-elementeillä CPR-arvot kuitenkin laskivat. CPR:n lasku oli kuitenkin pientä, suurimmaksi osaksi 0,1 %. Tarkastelussa myös havaittiin, että mitä suurempi karheus polttoaineille annettiin, sitä suurempia CPR-arvojen ja aktiivivirtauksien suhteelliset muutokset olivat. Lisäksi muutokset olivat valituilla ajopisteillä suurempia pienemmällä teholla ja pääkiertovirtauksella.

Kun kaikille polttoaine-elementeille annettiin karheutta, havaittiin, että joillakin CPR ja aktiivivirtaus saattoi kasvaa. Näin ollen polttoaine-elementit vaikuttavat toinen toisiinsa. Vaikka kaikki polttoaine-elementit olisivat karheita, aktiivivirtauksen väheneminen joillain polttoaine-elementeillä saattaa kasvattaa joidenkin muiden polttoaine-elementtien aktiivivirtausta ja siten myös niiden CPR-arvoa. Kuitenkin vähentynyt aktiivivirtaus ei välttämättä siirry kokonaan muille polttoaine-elementeille. Tarkastelussa havaittiin, että ohivirtaus kasvoi, kun eri ikäryhmille annettiin karheutta. Lisäksi havaittiin, että koko jakson aikaisen MCPR-arvon paikka reaktorissa voi vaihtua, kun polttoaineille annetaan karheutta.

Tarkastelu suoritettiin OL1-laitoksen 39. käyttöjaksolle ja OL2-laitoksen 37. käyttöjaksolle. Kuvien suuren määrän vuoksi tässä työssä on kuitenkin esitetty vain OL2-laitoksen kuvat, joista tulokset on katsottu.

CPR-arvon ja aktiivivirtauksen lasku karheilla polttoaine-elementeillä on havaittavissa esimerkiksi liitteen B kuvista. Esimerkiksi liitteen B kuvassa 27 on esitetty OL2-laitoksen 37. käyttöjakson nippukohtaisen CPR-arvon suhde sileän pinnan CPR-arvoon jakson kohdassa 500 EFPH (Effective Full Power Hour, täystehotunti), kun 0–1 vuotiaille polttoaine-elementeille on asetettu 1 μm karheus ja muut on oletettu sileiksi (teho 2500 MW ja pääkiertovirtaus 7650 kg/s). CPR-arvon lasku näkyy keltaisena ja kasvu sinisenä värinä. Kun kuvaa 27 verrataan kuvan 12 ikäluokkakajakaumaan, huomataan, että CPR-arvo laskee 0–1 vuotiaille. Muilla polttoaine-elementeillä CPR-arvo puolestaan kasvaa tai ei muutu. Lisäksi liitteen B kuvasta 28 voidaan havaita, että myös aktiivivirtaus 0–1 vuotiaille laskee, kun 0–1 vuotiaille polttoaine-elementeille on asetettu 1 μm karheus ja muut

on oletettu sileiksi. Muilla polttoaine-elementeillä puolestaan aktiivivirtaus saattaa kasvaa.

Liitteessä B kuvissa 29–34 on esitetty OL2-laitokselle CPR-arvon ja aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan arvoon kolmelle eri ajopisteelle, kun myös muille ikäryhmille on annettu karheutta. OL2-laitokselle ajopisteiksi valittiin täysi teho (teho 2500 MW, pääkiertovirtaus 7650 kg/s) ja kaksi CPR-arvojen kannalta rajoittavinta osatehopistettä (1900 MW, 4600 kg/s ja 1750 MW, 4000 kg/s). Kuvista 29–34 on poistettu luvut näkyvistä selkeytyksen vuoksi. Muutokset on kuitenkin nähtävissä värien avulla. Kuvissa CPR-arvon ja aktiivivirtauksen lasku on korostettu värillä, joka muuttuu keltaisesta oranssiin ja punaiseen. Punainen väri viittaa suurempaan laskuun. Sinisellä värillä on puolestaan kuvattu kasvua ja mitä tummempi se on, sitä suurempi kasvu. Näistä kuvista on myös havaittavissa, että CPR-arvo ja aktiivivirtaus laskevat karheilla polttoaine-elementeillä.

Eri ikäryhmien lisäksi CPR-arvojen ja aktiivivirtauksen laskua on havaittavissa yksittäisillä polttoaine-elementeillä, joille on annettu karheutta. Tämä näkyy liitteen C kuvissa 36–44, joissa on esitetty OL2-laitokselle CPR-arvojen ja aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan CPR-arvoihin ja aktiivivirtaukseen kohdassa 500 EFPH, kun yksittäisille polttoaine-elementeille on annettu karheutta.

Joissain tapauksissa kuitenkin sileiksi oletetuilla polttoaine-elementeillä CPR-arvot saattoivat laskea, vaikka aktiivivirtaus kyseisillä polttoaine-elementeillä ei muuttunut tai nousi. Liitteen C kuvassa 35 on esimerkki tällaisesta tapauksesta. Kuvassa on esitetty polttoaineiden CPR-arvon suhde sileän pinnan CPR-arvoon kohdassa 500 EFPH, kun polttoaine-elementeille (11, 19), (12, 8), (15, 19) ja (16, 8) on annettu 1 µm karheus (ajopiste 2500 MW 7650 kg/s). Kuvasta nähdään, että CPR-arvo laskee kyseisten polttoaine-elementtien lisäksi joillain sileiksi oletetuilla polttoaineilla. Liitteen C muissa kuvissa ja liitteen D kuvassa 45 on myös havaittavissa, että CPR-arvo laskee joillain sileiksi oletetuilla. Sileillä polttoaine-elementeillä CPR-arvon suhteellinen lasku vaikuttaa olevan kuitenkin hyvin pientä. Suurimmaksi osaksi lasku oli 0,1 %, mutta 0,4 % lasku esiintyi myös.

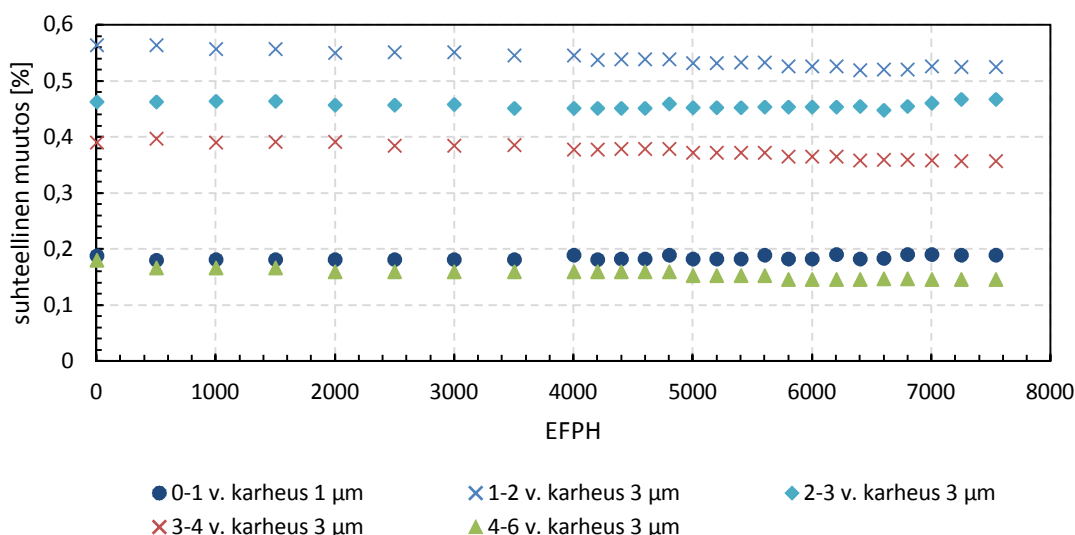
Liitteessä D on esitetty CPR-arvojen sekä aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan CPR-arvoihin ja aktiivivirtauksen arvoihin jakson kohdassa 500 EFPH kolmelle valitulle ajopisteelle, kun tietyn ikäluokan karheus on asetettu 20 µm arvoon. Kun liitteen D kuvia verrataan liitteen B kuviin, jossa on käytetty pienempää karheutta, huomataan, että suuremmalla karheudella CPR-arvot ja aktiivivirtaukset laskevat enemmän. Lisäksi mahdollinen CPR-arvojen ja aktiivivirtauksen kasvu sileiksi oletetuilla on suurempaa suuremmalla karheudella. Esimerkiksi liitteen D kuvassa 45 on tummemmat värit kuin vastaavassa liitteen B kuvassa 29, mikä viittaa suurempaan muutokseen.

Kun kolmen valitun ajopisteen tuloksia verrataan toisiinsa, huomataan, että alhaisemalla teholla ja pääkiertovirtauksella CPR-arvojen ja aktiivivirtauksen suhteellinen lasku

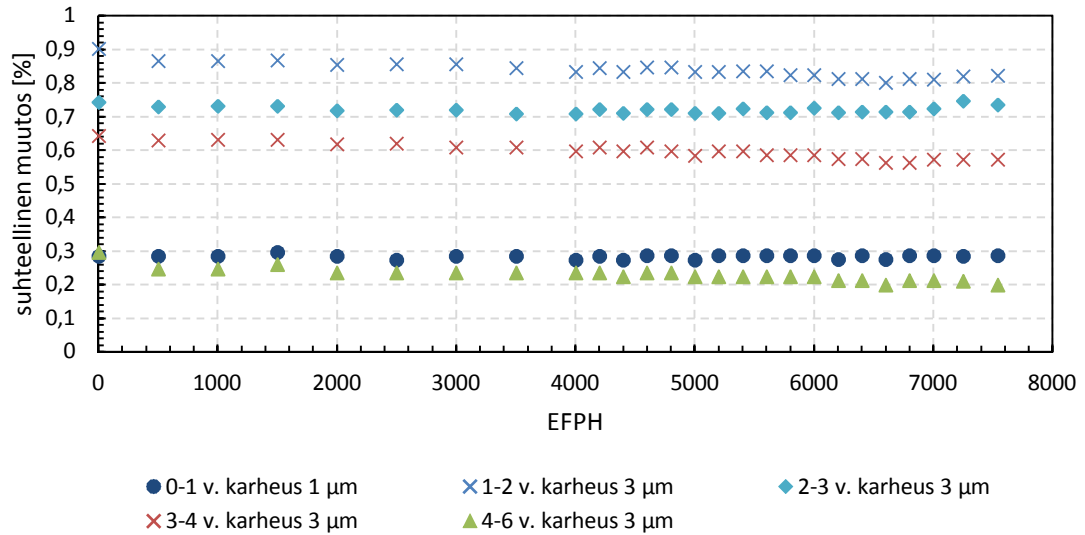
ja kasvu on suurempaa. Esimerkiksi liitteen B kuvassa 33 näkyy tummemmat värit kuin vastaavassa kuvassa 29.

Liitteen H kuvissa 130, 132 ja 134 on esitetty OL2-laitokselle CPR-arvojen ja aktiivivirtausten suhde sileän pinnan CPR-arvoihin ja aktiivivirtauksen arvoihin jakson kohdassa 500 EFPH ja 7000 EFPH, kun 0–1 vuotiailla polttoaine-elementeillä on karheutta 1 μm ja muilla 3 μm . Kohdan 500 EFPH aktiivivirtauksista on lisäksi esitetty ero liitteen B aktiivivirtauksiin (liitteen H tapaus – liitteen B tapaus), jossa ikäluokille on annettu erikseen vastaavat karheusarvot (kuvat 131, 133 ja 135). Kun tarkastellaan CPR-arvojen ja aktiivivirtausten suhdetta sileän pinnan arvoihin (kuvat 130, 132 ja 134), huomataan, että vaikka kaikilla on karheutta, osalla polttoaine-elementeistä CPR-arvot ja aktiivivirtaukset kasvavat. Kun aktiivivirtauksia verrataan liitteen B aktiivivirtauksiin (kuvat 130, 132 ja 134), huomataan, että tietyn ikäryhmän aktiivivirtaus on suurempaa verrattuna siihen, että vain kyseille ikäryhmälle olisi annettu karheutta ja oletettu muut sileiksi. Esimerkiksi kuvan 131 ensimmäisestä kartasta nähdään, että 0–1 vuotiaiden polttoaine-elementtien (karheus 1 μm) aktiivivirtaus on suurempaa, kun muilla polttoaine-elementeillä on karheutta kuin, että ne olisivat sileitä. Tästä voidaan päätellä, että polttoaine-elementit vaikuttavat toinen toisiinsa. Kun jostain polttoaine-elementistä aktiivivirtaus vähenee, se voi kasvattaa muiden aktiivivirtausta.

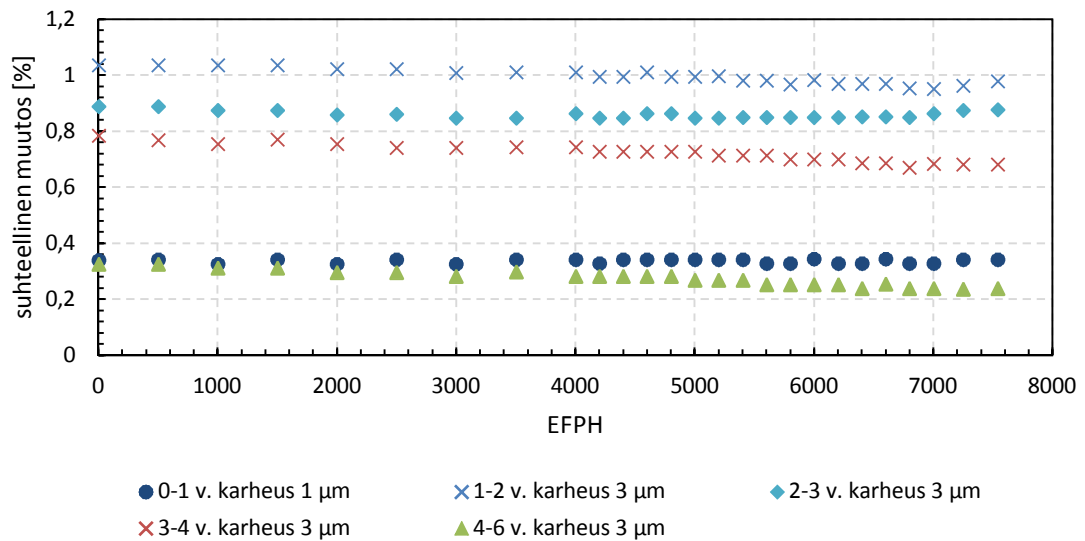
Muiden polttoaine-elementtien aktiivivirtauksien kasvun lisäksi, aktiivivirtauksen väheneminen joissakin polttoaine-elementeissä voi kasvattaa ohivirtausta. Esimerkiksi, kun tietylle ikäluokalle annettiin karheutta (0–1 vuotiaille 1 μm ja muille 3 μm) ja oletettiin muut sileiksi, ohivirtaus kasvoi verrattuna siihen, että kaikki polttoaineet olisivat sileitä. OL2-laitokselle tämä on nähtävissä kuvista 16, 17 ja 18.



Kuva 16. OL2c37 - Ohivirtauksen suhteellinen muutos, kun tietylle ikäluokalle on annettu karheutta ja muut on oletettu sileiksi. 0–1 vuotiaille karheutta annettu 1 μm ja muille 3 μm (2500 MW, 7650 kg/s).

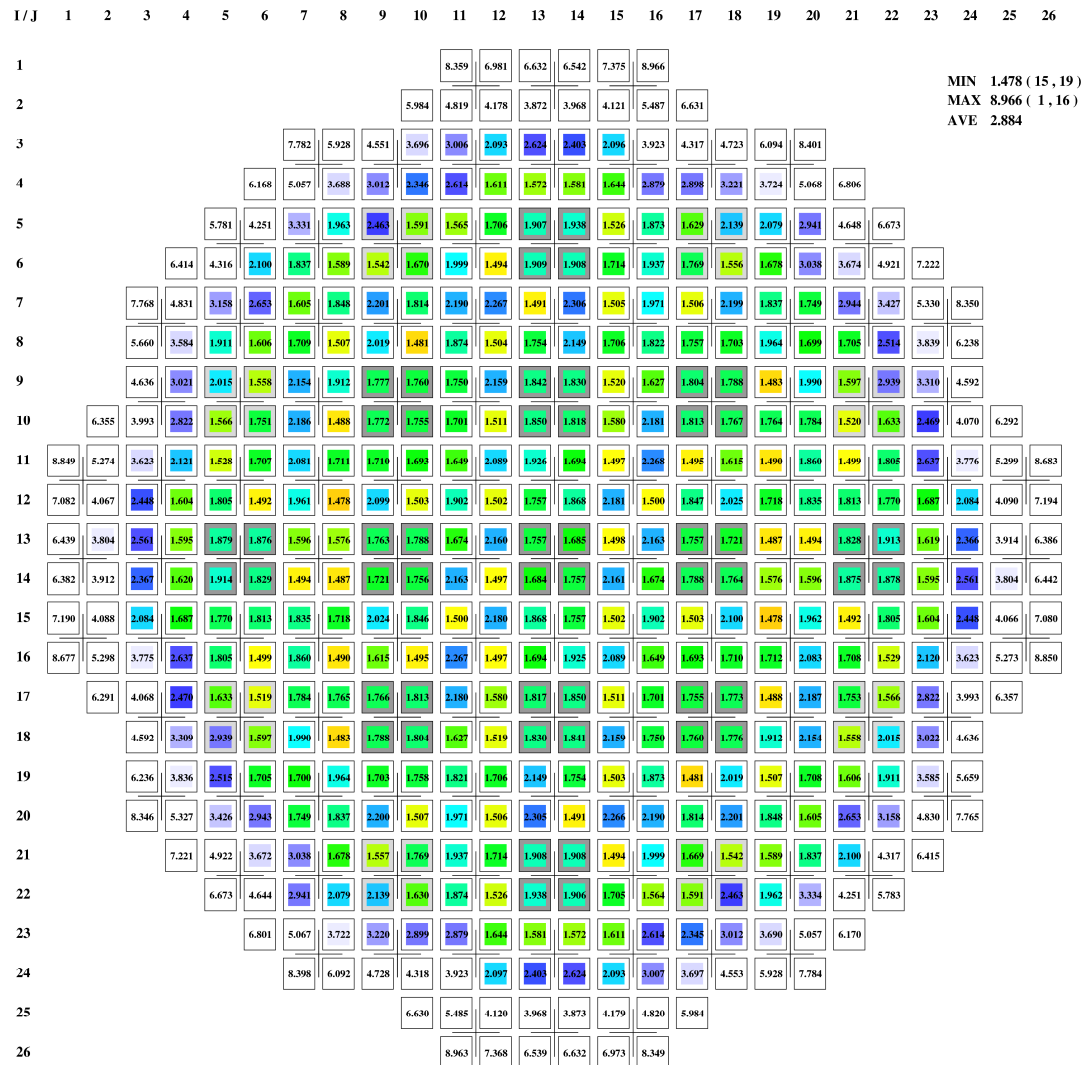


Kuva 17. OL2c37 - Ohivirtauksen suhteellinen muutos, kun tietyllä ikäluokalle on annettu karheutta ja muut on oletettu sileiksi. 0–1 vuotiaille karheutta annettu 1 μm ja muille 3 μm (1900 MW, 4600 kg/s).

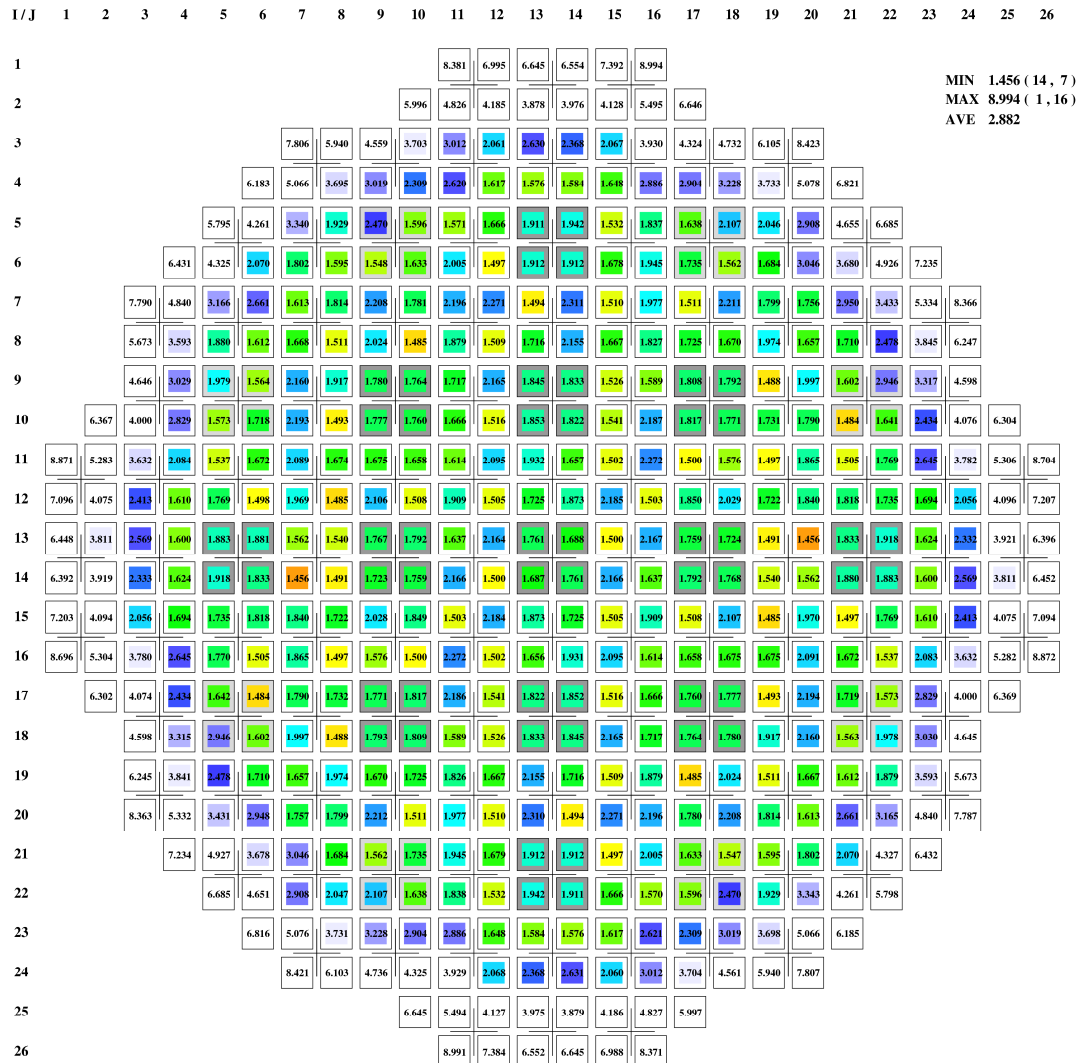


Kuva 18. OL2c37 - Ohivirtauksen suhteellinen muutos, kun tietyllä ikäluokalle on annettu karheutta ja muut on oletettu sileiksi. 0–1 vuotiaille karheutta annettu 1 μm ja muille 3 μm (1750 MW, 4000 kg/s).

Lisäksi jakson aikaisen pienimmän CPR-arvon paikka reaktorissa voi muuttua, kun polttoaineille annetaan karheutta. Esimerkiksi OL2-laitoksen 37. käyttöjaksolle ajopisteessä 1750 MW 4000 kg/s, kun kaikki polttoaineet ovat sileitä, MCPR-arvon paikka on koordinaateissa (12, 8) ja (15, 19) (kuva 19). Kun 1–2 vuotiaille polttoaine-elementeille antaa 3 μm karheuden ja olettaa muut sileiksi, MCPR-arvon paikka on koordinaateissa (14, 7) ja (13, 20) (kuva 20).



Kuva 19. OL2c37 – Nippukohtainen pienin CPR jakson aikana, kun kaikki polttoaine-elementit ovat sileitä. Pienin CPR-arvo koordinaateissa (12, 8) ja (15, 19). Ajopiste 1750 MW, 4000 kg/s.



Kuva 20. OL2c37 – Nippukohtainen pienin CPR jakson aikana, kun 1–2 vuotiaille on annettu karheus 3 μ m ja muut oletettu sileiksi. Pienin CPR-arvo koordinaateissa (14, 7) ja (13, 20). Ajopiste 1750 MW, 4000 kg/s.

6.2.2 Polttoainesauvojen karheuden vaikutus reaktorin MCPR-arvoon

Kuten edellisessä luvussa kerrottiin, kasvattamalla yksittäisten polttoaine-elementtien tai tietyn ikäluokan karheutta, kyseisten polttoaine-elementtien CPR-arvot laskevat. Kun tarkasteltiin koko reaktorin MCPR-arvoa, se ikäryhmä, jonka polttoaine-elementillä oli pienin CPR, kitkan lisääminen tälle ikäryhmälle pienensi koko reaktorin MCPR-arvoa. Muilla ikäluokilla kitkan lisääminen puolestaan laski koko reaktorin MCPR-arvoa vasta, kun karheutta oli riittävästi, että ikäluokan MCPR-arvo meni alle koko reaktorin pienimmän CPR-arvon. Tätä pienemmillä karheusarvoilla koko reaktorin MCPR-arvo saattoi kasvaa.

Tarkastelussa havaittiin, että 0–1 vuotiaiden karheus laskee koko reaktorin MCPR-arvoa, sillä näillä on alun perin pienin CPR-arvo. Jakson alussa kuitenkin 1–2 vuotiailla voi olla pienin CPR-arvo, jolloin 0–1 vuotiaiden karheus saattaa kasvattaa reaktorin MCPR-arvoa jakson alussa. Antamalla karheutta puolestaan 1–2 vuotiaille reaktorin MCPR-arvo laski jakson alussa, mutta muulloin nousi. Muut ikäluokat puolestaan kasvattavat reaktorin MCPR-arvoa, sillä niillä karheuden tulisi olla hyvin suuri, että MCPR-arvo laskisi. Tarkastelu suoritettiin OL1- ja OL2-laitoksille. Tämän työn liitteessä E on kuitenkin esitetty vain OL2-laitokselle saadut kuvat kuvien suuren määrän vuoksi.

Liitteessä E on esitetty OL2-laitoksen 37. käyttöjakson koko reaktorin MCPR-arvon muuttuminen jakson aikana kolmella ajopisteellä, kun eri ikäluokille on annettu eri karheusarvoja. Lisäksi liitteen E kuvissa 51–53 on esitetty eri ikäluokkien MCPR-arvot, kun pinta on sileä. Liitteen E kuvista 54, 55, 64, 65, 74 ja 75 nähdään, että 0–1 vuotiailla polttoaine-elementeillä karheuden kasvattaminen pienentää reaktorin MCPR-arvoa. Lasku on suurempaa, mitä suurempi karheus on. Kuvista 51–53 on nähtävissä, että suurimman osan jaksosta 0–1 vuotiailla on alun perin pienin CPR-arvo, joten tulos on järkevä. Kuvasta 55 näkyy kuitenkin, että 0–1 vuotiaiden ollessa 0,5 ja 1 μm karheita MCPR-arvo nousee jakson alussa ajopisteellä 2500 MW 7650 kg/s. Tämä johtuu luultavasti siitä, että jakson alussa 1–2 vuotiailla on pienin CPR-arvo ja karheusarvot 0,5 ja 1 μm eivät ole tarpeeksi suuria laskemaan 0–1 vuotiaiden CPR-arvoa tämän ohi ajopisteellä 2500 MW 7650 kg/s.

Liitteen E kuvissa 56, 57, 66, 67, 76 ja 77 näkyy reaktorin MCPR-arvon muuttuminen, kun 1–2 vuotiaille polttoaine-elementeille on annettu eri karheusarvoja. Kuvista nähdään, että jakson alussa reaktorin MCPR-arvo laskee, mutta tämän jälkeen nousee annetuilla karheusarvoilla. Lasku ja kasvu on sitä suurempaa, mitä suurempi karheus on. 2–3, 3–4 ja 4–6 vuotiaiden karheus puolestaan kasvattaa reaktorin MCPR-arvoa (kuvat 58–63, 68–73 ja 78–83). Näillä karheuden tulee olla hyvin suuri, jotta reaktorin MCPR-arvo laskisi. Esimerkiksi 2–3 vuotiailla ajopisteessä 1750 MW 4000 kg/s (kuva 79) karheusarvolla 50 μm reaktorin MCPR laskee jakson alussa. Liitteen E kuvista on myös havaittavissa, että valituista ajopisteistä alhaisemmalla teholla ja pääkiertovirtauksella MCPR-arvon lasku ja kasvu on yleisesti suurempaa.

Liitteessä F puolestaan on esitetty OL2-laitoksen 37. käyttöjakson reaktorin MCPR-arvon muuttuminen valituissa ajopisteissä, kun eri ikäluokille on annettu vain niiden maksimikarheus (0–1 vuotiaille 1 ja muille 3 μm , ks. luku 6.1). 1–2 vuotiaille on myös annettu karheus 1 μm , sillä 1–2 vuotiaille crudia on luultavasti vielä kertynyt vähän, jolloin 3 μm voi olla liian suuri karheus. Liitteen F kuvista 85, 87 ja 89 näkyy, miten MCPR muuttuu suhteessa tapaukseen, jossa kaikki polttoaine-elementit ovat sileitä. Muutoksista on koottu taulukoon 5 OL2-laitoksen MCPR-arvon koko jakson aikainen suurin suhteellinen lasku. Taulukossa 6 on puolestaan reaktorin MCPR-arvon suurin kasvu koko jakson ajalta. Taulukossa 7 on vastaavasti esitetty OL1-laitoksen 39. käyttöjakson MCPR-arvon suurin lasku. Taulukossa 8 on puolestaan MCPR-arvon suurin kasvu OL1-laitokselle.

Taulukoista nähdään, että MCPR-arvon mahdollinen lasku on suurempaa kuin mahdollinen kasvu. Kun 0–1 tai 1–2 vuotiailla karheus on 1 μm , MCPR-arvon lasku on maksimissaan noin 1 %. Kun 1–2 vuotiailla karheus on 3 μm , lasku on maksimissaan 3 %:a. Liitteen F kuvista kuitenkin huomataan, että suurin MCPR-arvon lasku ei välttämättä ole jakson kohdassa, jossa MCPR-arvo on alun perin pienimmillään vaan voi tapahtua kohdassa, jossa CPR-arvolla on enemmän marginaalia. Kuvista 85, 87 ja 89 nähdään, että OL2-laitokselle MCPR-arvo laskee jakson alussa eniten, kun 1–2 vuotiaille annetaan 1 μm ja 3 μm karheus. Kuvista 84, 86 ja 88 kuitenkin nähdään, että jakson alussa MCPR-arvolla on suurempi arvo kuin jakson lopussa. Kun puolestaan 0–1 vuotiaille annetaan 1 μm karheus, lasku on tasaisempaa koko jakson ajan.

Taulukko 5. *OL2c37:n reaktorin MCPR-arvon suurin lasku [%] koko jakson aikana valituissa ajopisteissä, kun eri ikäluokille on annettu sen maksimikarheus. Näistä laskuista kunkin tapauksen suurin lasku on korostettu.*

Ikä vuosissa	Karheus [μm]	2500 MW 7650 kg/s	1900 MW 4600 kg/s	1750 MW 4000 kg/s
0–1	1	–0,41	–0,87	–0,95
1–2	1	–0,40	–0,86	–0,94
1–2	3	–1,14	–2,27	–2,54

Taulukko 6. *OL2c37:n reaktorin MCPR-arvon suurin kasvu [%] koko jakson aikana valituissa ajopisteissä, kun eri ikäluokille on annettu sen maksimikarheus. Kasvuista suurin on korostettu.*

Ikä vuosissa	Karheus [μm]	2500 MW 7650 kg/s	1900 MW 4600 kg/s	1750 MW 4000 kg/s
0–1	1	0,07	-	-
1–2	1	0,14	0,20	0,20
1–2	3	0,27	0,47	0,47
2–3	3	0,33	0,60	0,60
3–4	3	0,20	0,27	0,27
4–6	3	0,07	0,07	0,07

Taulukko 7. *OL1c39:n reaktorin MCPR-arvon suurin lasku [%] koko jakson aikana valituissa ajopisteissä, kun eri ikäluokille on annettu sen maksimikarheus. Näistä laskuista kunkin tapauksen suurin lasku on korostettu.*

Ikä vuosissa	Karheus [μm]	2500 MW 7650 kg/s	1900 MW 4600 kg/s	1750 MW 4000 kg/s
0–1	1	–0,33	–0,60	–0,67
1–2	1	-	–0,62	–0,62
1–2	3	-	–1,61	–1,75

Taulukko 8. *OL1c39:n reaktorin MCPR-arvon suurin kasvu [%] koko jakson aikana valituissa ajopisteissä, kun eri ikäluokille on annettu sen maksimikarheus. Kasvuista suurin on korostettu.*

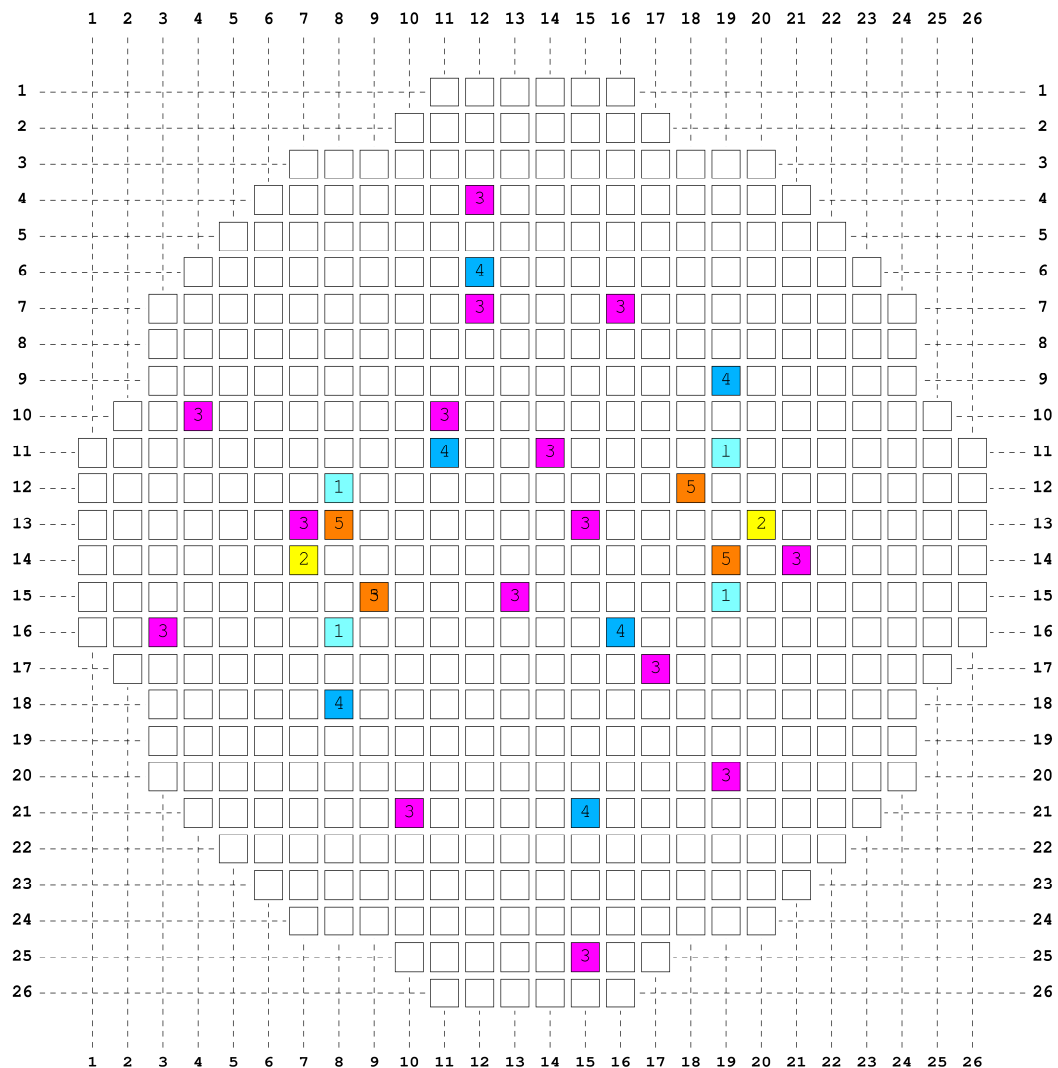
Ikä vuosissa	Karheus [μm]	2500 MW 7650 kg/s	1900 MW 4600 kg/s	1750 MW 4000 kg/s
0–1	1	-	-	-
1–2	1	0,07	0,13	0,13
1–2	3	0,21	0,27	0,33
2–3	3	0,21	0,37	0,39
3–4	3	0,14	0,20	0,20
4–6	3	0,07	0,07	0,07

6.2.3 CPR-arvojen lasku eri ikäryhmillä ja yksittäisillä polttoaine-elementeillä

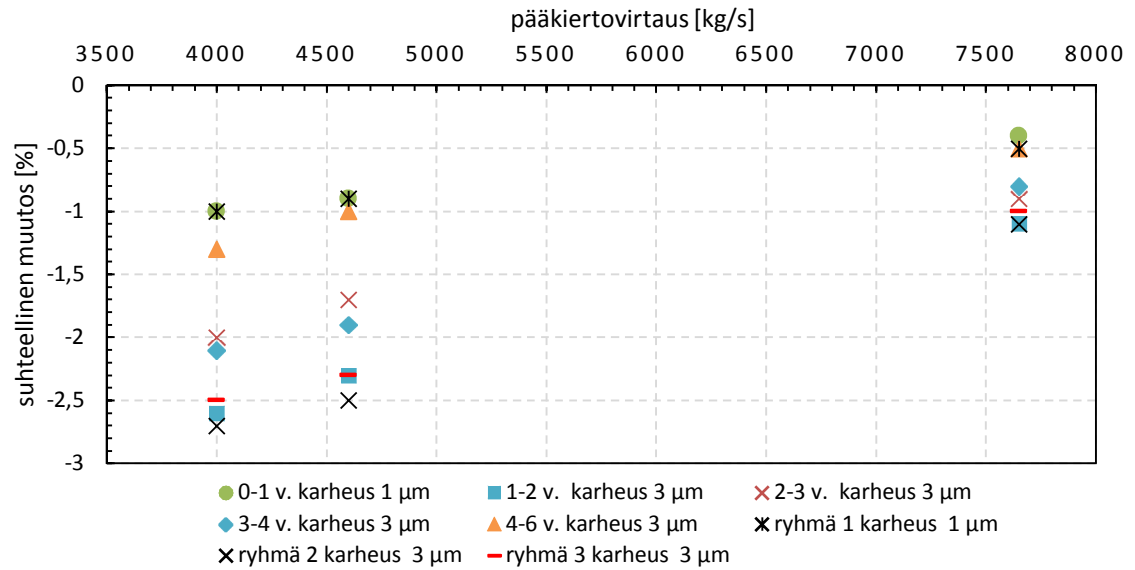
Kuten jo luvussa 6.2.1 mainittiin, aktiivivirtauksen väheneminen joillain polttoaine-elementeillä voi kasvattaa muiden aktiivivirtausta. Vaikka kaikilla polttoaine-elementeillä olisi karheutta, voi joidenkin polttoaine-elementtien CPR-arvo ja aktiivivirtaus kasvaa. Jotta saataisiin selville karheuden maksimivaikutus, eri ikäisille polttoaine-elementeille määritettiin CPR-arvon suurin lasku, kun polttoaineiden karheutta kasvatettiin ikäryhmä kerrallaan vastaamaan ikäryhmän määritettyä maksimikarheutta ja olettaen muut polttoaine-elementit sileiksi. 0–1 vuotiailla oletettiin olevan karheutta maksimissaan 1 μm ja muilla 3 μm (ks. luku 6.1). CPR-arvojen muutokset katsottiin liitteen B kuvan 27 ja liitteen C kuvan 35 mukaisista nippukohtaisten CPR-arvojen suhteesta sileän pinnan CPR-arvoon. Kuvien oikeassa yläkulmassa on nähtävissä pienin suhde kohdasta ”MIN”. Esimerkiksi kuvan 27 tapauksessa pienin suhde on 0,996 ja CPR-arvon lasku siten 0,4 %. Tarkastelussa kuitenkin katsottiin CPR-arvojen muutokset koko käyttöjakson ajalta. Kuvissa 27 ja 35 CPR-arvojen muutokset on esitetty kohdassa 500 EFPH. Koko käyttöjakson kuvia ei ole esitetty niiden suuren määrän vuoksi. Liitteiden B ja C muissa kuvissa on nähtävissä myös CPR-arvojen muutokset OL2-laitokselle kohdassa 500 EFPH, kun eri ikäluokille ja yksittäisille polttoaine-elementeille on annettu maksimikarheus. Kuvista on otettu luvut pois selkeytyksen vuoksi, mutta oikean yläkulman pienin suhde on jätetty näkyviin.

Kuvassa 22 on esitetty OL2-laitoksen 37. käyttöjakson CPR-arvon suurin lasku eri ikäluokilla, kun vain kyseiselle ikäluokalle on annettu sen maksimikarheus. Kuvassa 23 puolestaan on sama OL1-laitoksen 39. käyttöjaksolle. Kuvassa 22 on myös esitetty OL2-laitokselle CPR-arvon suurin lasku yksittäisillä polttoaine-elementeillä, kun kyseisille polttoaine-elementeille on annettu karheutta. Kuvassa 23 on sama OL1-laitokselle. OL2-laitokselle tarkasteltaviksi yksittäisiksi polttoaineryhmiä valittiin kuvan 21 mukaisesti ryhmät 1 (0–1 vuotiaita), 2 (1–2 vuotiaita) ja 3 (satunnaiset). OL1-laitokselle puolestaan

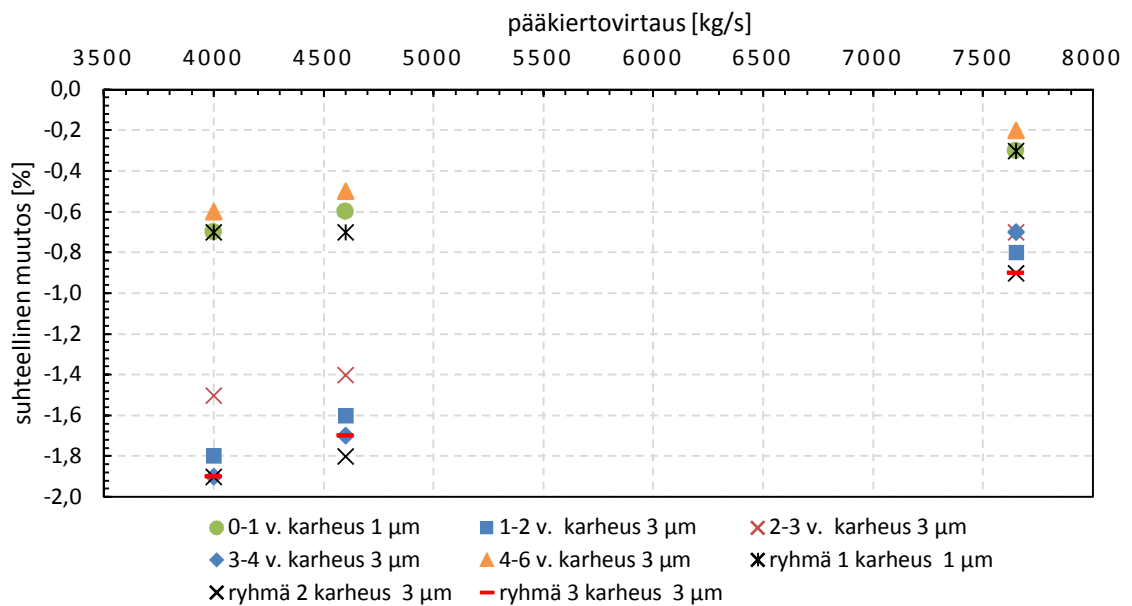
tarkasteltaviksi yksittäisiksi polttoaineryhmiksi valittiin kuvan 21 mukaisesti ryhmät 4 (0–1 vuotiaita), 5 (1–2 vuotiaita) ja 3 (satunnaiset). OL2-laitokselle polttoaineryhmän 1 valintakriteerinä oli se, että niillä oli pienin CPR-arvo, kun kaikki polttoaine-elementit olivat sileitä ja kun 0–1 vuotiaille annettiin karheutta. Ryhmä 2 valittiin tarkasteluun, koska niillä oli pienin CPR jakson aikana, kun 1–2 vuotiaille annettiin 3 μm karheus ja muut oletettiin sileiksi (ajopisteissä 1900 MW 4600 kg/s ja 1750 MW 4000 kg/s) sekä kun 1–2 vuotiaille annettiin 20 μm karheus ja muut oletettiin sileiksi (kaikki kolme valittua ajopistettä). OL1-laitokselle ryhmä 4 valittiin, koska pienin CPR vaihteli näiden välillä, kun 0–1 vuotiaille annettiin karheutta joko 3 tai 20 μm ja muut oletettiin sileiksi sekä kun kaikki polttoaine-elementit oletettiin sileiksi. Ryhmä 5 valittiin puolestaan, koska 1–2 vuotiaiden pienin CPR vaihteli niiden välillä, kun 1–2 vuotiaille annettiin karheutta joko 3 tai 20 μm ja muut oletettiin sileiksi sekä kun kaikki polttoaine-elementit oletettiin sileiksi.



Kuva 21. OL2c37 ja OL1c39 tarkasteluun valitut yksittäiset polttoaineryhmät. OL2: ryhmä 1 (0–1 vuotiaat), ryhmä 2 (1–2 vuotiaat) ja ryhmä 3 (satunnaiset). OL1: ryhmä 4 (0–1 vuotiaat), ryhmä 5 (1–2 vuotiaat) ja ryhmä 3 (satunnaiset).



Kuva 22. OL2c37:n CPR-arvon suurin lasku [%] eri ikäluokilla ja yksittäisillä polttoaine-elementeillä, kun vain kyseisille polttoaine-elementeille on annettu maksimikarheus.



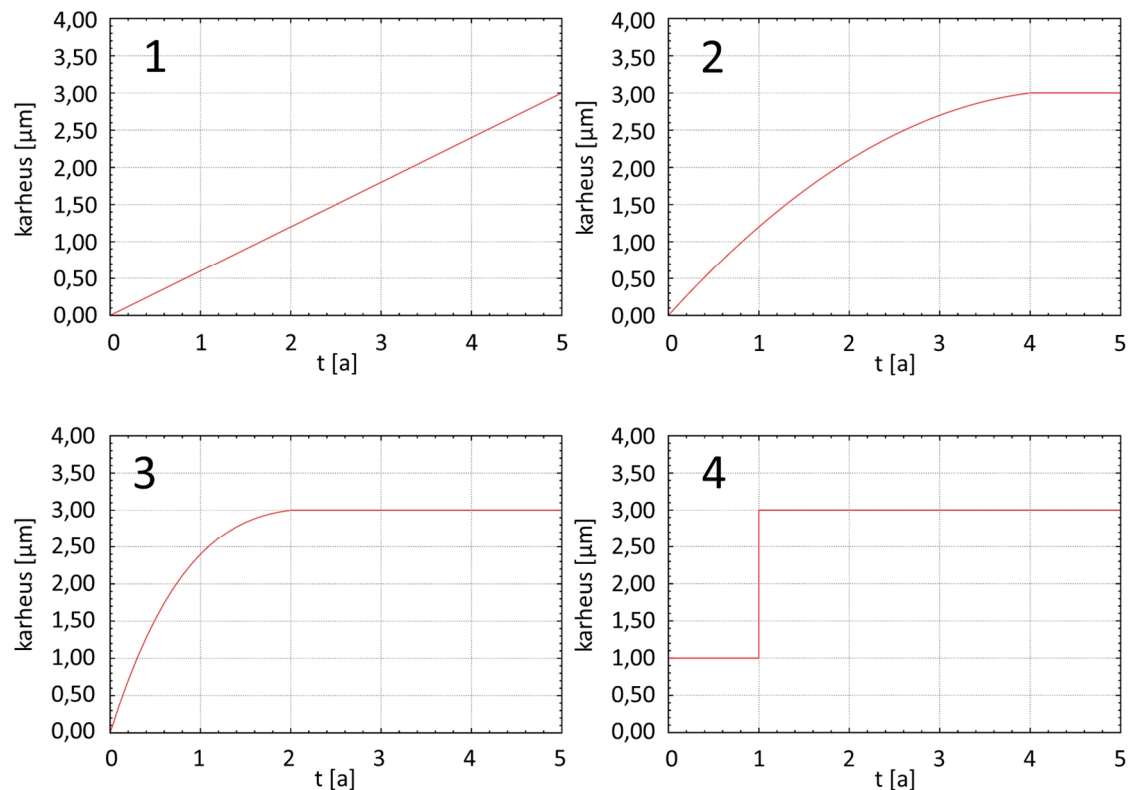
Kuva 23. OL1c39:n CPR-arvon suurin lasku [%] eri ikäluokilla ja yksittäisillä polttoaine-elementeillä, kun vain kyseisille polttoaine-elementeille on annettu maksimikarheus.

Kuvista 22 ja 23 nähdään, että CPR-arvon lasku 0–1 vuotiaille on maksimissaan 1 % ja muilla alle 3 %:a. OL1-laitokselle suurin CPR:n lasku 0–1 vuotiaille on 0,7 %:a ja muilla 1,9 %:a. OL2-laitokselle puolestaan suurin CPR-arvon lasku 0–1 vuotiaille on 1,0 % ja muilla 2,7 %:a. 0–1 vuotiaille yksittäisille polttoaine-elementeille saadut tulokset eivät juurikaan eroa koko ikäluokan tuloksesta. Samoin eivät 1–2 vuotiaat yksittäiset ja satunnaiset eroa merkittävästi koko 1–2 vuotiaiden tuloksista.

Tietyn ikäluokan CPR-arvon suurin lasku ei kuitenkaan välttämättä ole jakson kohdassa, jossa kyseisen ikäluokan CPR-arvo on pienemmillään. Tämän tutkimiseksi piirrettiin kuvaajat eri ikäluokkien MCPR-arvon muuttumisesta jakson aikana. Liitteessä G on esitetty OL2-laitokselle saadut kuvaajat. Esimerkiksi kuvasta 92 nähdään, että CPR-arvon suurin lasku ei ole jakson kohdassa, jossa ikäluokan CPR-arvo on alun perin pienemmillään. Kuvassa 91 puolestaan suurin lasku on kohdassa, jossa CPR-arvokin on alun perin pienemmillään.

6.2.4 CPR-arvojen muuttuminen, kun karheus kehittyy ajan funktiona

CPR- ja reaktorin MCPR-arvon todellisen laskun selvittämiseksi eri ikäluokkien CPR-arvojen sekä koko reaktorin MCPR-arvon muuttumista tutkittiin, kun kaikille polttoaineille annettiin karheusarvo sen mukaan, miten karheus kasvaa ajan funktiona. Todellista pinnankarheuden kasvun funktiota ei saatu selville, joten kasvulle annettiin erilaisia funktioita. Kuvassa 24 on esitetty laskennassa käytetyt funktiot. Funktiossa 1 karheus kasvaa lineaarisesti oletettuun crudin maksimikarheuteen eli arvoon $3\text{ }\mu\text{m}$ (ks. luku 6.1). Funktiossa 2 ja 3 karheuden kasvu on aluksi nopeampaa, mutta tasaantuu lopuksi arvoon $3\text{ }\mu\text{m}$. Funktiossa 4 on oletettu, että 0–1 vuotiailla polttoaine-elementeillä pinnankarheus on $1\text{ }\mu\text{m}$ ja muilla $3\text{ }\mu\text{m}$.



Kuva 24. Karheuden kasvu ajan funktiona. Funktiot 1, 2, 3 ja 4.

Liitteen H kuvissa 106, 113, 120 ja 127 ja on esitetty karheuden kasvu ajan funktiona eri ikäluokille OL2-laitoksen tapauksessa. Karheuden kasvussa on oletettu, että 4–6 vuotiaiden polttoaine-elementtien kasvu vastaa vuosien 4–5 kasvua. Liitteessä H on esitetty myös OL2-laitokselle MCPR-arvon muuttuminen jakson aikana eri karheuden kasvun funktioilla (kuvat 107, 108, 114, 115, 121, 122, 128 ja 129). Kuvista nähdään, että pinnan karheuden kasvu voi joissain jakson kohdissa laskea MCPR-arvoa ja joissain kohdissa kasvattaa. Lisäksi liitteessä on esitetty CPR-arvojen ja aktiivivirtausten muuttuminen kohdassa 500 EFPH ja 7000 EFPH eri karheuden kasvun funktioilla (kuvat 109–111, 116–118, 123–125, 130, 132 ja 134). Kun näitä kahta jakson kohtaa vertaa toisiinsa, huomataan, että tilanne voi muuttua, kun karheus kehittyy. Esimerkiksi polttoaine-elementit, joilla CPR-arvo aluksi nousee, voikin jakson lopussa CPR-arvo laskea (esim. kuva 123).

CPR-arvojen suhteelliset muutokset eri ikäluokilla saatiin selville piirtämällä ensin koko käyttöjakson ajalle reaktorikartat CPR-arvojen suhteesta sileän pinnan CPR-arvoon. Näitä kuvia muokattiin sitten siten, että niissä näkyi aina vain tietyn ikäluokan CPR-arvojen muutokset. CPR-arvojen pienin suhde katsottiin kuvien oikeassa yläkulmassa olevasta kohdasta ”MIN”, kuten luvussa 6.2.3. Näitä kuvia ei ole esitelty niiden suuren määrän vuoksi.

Taulukossa 9 on esitetty OL2-laitoksen 37. käyttöjakson reaktorin MCPR-arvon suurin lasku eri karheuden funktioilla. Taulukossa 10 on puolestaan reaktorin MCPR-arvon suurin kasvu koko jakson aikana eri karheuden funktioilla. Taulukossa 11 on esitetty OL2-laitokselle CPR-arvon suhteellisen muutoksen pienin arvo koko jakson aikana eri ikäluokille, kun karheus kehittyy ajan funktiona. Taulukosta 9 nähdään, että OL2-laitokselle MCPR-arvon suurimmaksi laskuksi saatiin 1,61 %:a. Taulukosta 11 puolestaan nähdään, että 0–1 vuotiailla CPR-arvon suurin lasku oli 1,0 %, 4–6 vuotiailla 0,9 %:a ja muilla 1,8 %:a.

Taulukossa 12 on esitetty OL1-laitoksen 39. käyttöjakson reaktorin MCPR-arvon suurin lasku eri karheuden funktioilla. Taulukossa 13 on puolestaan reaktorin MCPR-arvon suurin kasvu eri karheuden funktioilla. Taulukossa 14 on esitetty OL1-laitoksen CPR-arvon suhteellisen muutoksen pienin arvo eri ikäluokille, kun karheus kehittyy ajan funktiona. Taulukosta 12 nähdään, että OL1-laitokselle MCPR-arvon suurimmaksi laskuksi saatiin 1,12 %:a. Taulukosta 14 puolestaan nähdään, että 0–1 vuotiailla CPR-arvon suurin lasku oli 0,7 %:a, 4–6 vuotiailla 0,3 %:a ja muilla 1,4 %:a.

Taulukko 9. OL2c37:n reaktorin MCPR-arvon suurin lasku [%] koko jakson aikana eri karheuden funktioilla valituissa ajopisteissä. Laskuista suurin on korostettu.

Funktio	2500 MW 7650 kg/s	1900 MW 4600 kg/s	1750 MW 4000 kg/s
1	-	-0,20	-0,20
2	-0,13	-0,46	-0,47
3	-0,47	-1,14	-1,27
4	-0,60	-1,40	-1,61

Taulukko 10. OL2c37:n reaktorin MCPR-arvon suurin kasvu [%] koko jakson aikana eri karheuden funktioilla valituissa ajopisteissä.

Funktio	2500 MW 7650 kg/s	1900 MW 4600 kg/s	1750 MW 4000 kg/s
1	0,20	0,40	0,41
2	0,34	0,61	0,68
3	0,41	0,74	0,81
4	0,14	0,20	0,14

Taulukko 11. OL2c37:n CPR-arvon suhteellisen muutoksen pienin arvo [%] koko jakson aikana eri ikäluokilla valituissa ajopisteissä, kun karheus kehittyy ajan funktiona. Eri ikäluokkien suurin CPR-arvon lasku on korostettu.

Ikä vuosissa	Funktio 1.			Funktio2.		
	2500 MW 7650 kg/s	1900 MW 4600 kg/s	1750 MW 4000 kg/s	2500 MW 7650 kg/s	1900 MW 4600 kg/s	1750 MW 4000 kg/s
0–1	0,0	0,1	0,0	-0,1	-0,1	-0,2
1–2	-0,2	-0,4	-0,4	-0,4	-0,7	-0,9
2–3	-0,3	-0,6	-0,7	-0,5	-0,9	-1,2
3–4	-0,4	-1,0	-1,1	-0,5	-1,3	-1,5
4–6	-0,3	-0,7	-0,9	-0,3	-0,7	-0,9

Ikä vuosissa	Funktio 3.			Funktio 4.		
	2500 MW 7650 kg/s	1900 MW 4600 kg/s	1750 MW 4000 kg/s	2500 MW 7650 kg/s	1900 MW 4600 kg/s	1750 MW 4000 kg/s
0–1	-0,4	-0,8	-1,0	0,0	0,0	-0,1
1–2	-0,6	-1,3	-1,5	-0,7	-1,5	-1,8
2–3	-0,6	-1,3	-1,5	-0,5	-1,1	-1,3
3–4	-0,5	-1,3	-1,4	-0,4	-1,1	-1,3
4–6	-0,3	-0,6	-0,7	-0,2	-0,5	-0,6

Taulukko 12. *OL1c39:n reaktorin MCPR-arvon suurin lasku [%] koko jakson aikana eri karheuden funktioilla valituissa ajopisteissä. Laskuista suurin on korostettu.*

Funktio	2500 MW 7650 kg/s	1900 MW 4600 kg/s	1750 MW 4000 kg/s
1	-	-0,12	-0,12
2	-0,07	-0,37	-0,37
3	-0,28	-0,87	-0,94
4	-	-1,06	-1,12

Taulukko 13. *OL1c39:n reaktorin MCPR-arvon suurin kasvu [%] koko jakson aikana eri karheuden funktioilla valituissa ajopisteissä.*

Funktio	2500 MW 7650 kg/s	1900 MW 4600 kg/s	1750 MW 4000 kg/s
1	0,20	0,31	0,32
2	0,27	0,49	0,49
3	0,33	0,55	0,52
4	0,14	0,13	0,12

Taulukko 14. *OL1c39:n CPR-arvon suhteellisen muutoksen pienin arvo [%] koko jakson aikana eri ikäluokilla valituissa ajopisteissä, kun karheus kehittyy ajan funktiona. Eri ikäluokkien suurin CPR-arvon lasku on korostettu.*

Ikä vuosissa	Funktio 1.			Funktio 2.		
	2500 MW 7650 kg/s	1900 MW 4600 kg/s	1750 MW 4000 kg/s	2500 MW 7650 kg/s	1900 MW 4600 kg/s	1750 MW 4000 kg/s
0–1	-0,1	0,0	0,0	-0,1	-0,1	-0,2
1–2	-0,2	-0,3	-0,4	-0,3	-0,6	-0,7
2–3	-0,3	-0,6	-0,7	-0,4	-0,8	-1,0
3–4	-0,4	-1,0	-1,1	-0,5	-1,3	-1,4
4–6	-0,1	-0,2	-0,3	-0,1	-0,2	-0,3

Ikä vuosissa	Funktio 3.			Funktio 4.		
	2500 MW 7650 kg/s	1900 MW 4600 kg/s	1750 MW 4000 kg/s	2500 MW 7650 kg/s	1900 MW 4600 kg/s	1750 MW 4000 kg/s
0–1	-0,3	-0,6	-0,7	-0,1	-0,1	-0,1
1–2	-0,5	-0,9	-1,1	-0,5	-1,1	-1,2
2–3	-0,5	-1,0	-1,2	-0,5	-0,9	-1,1
3–4	-0,5	-1,3	-1,4	-0,4	-1,1	-1,3
4–6	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1

Kuten luvussa 6.2.2, reaktorin MCPR-arvon suurin lasku ei kuitenkaan välttämättä ole jakson kohdassa, jossa MCPR-arvo on alun perin pienimmillään vaan voi tapahtua kohdassa, jossa CPR-arvolla on enemmän marginaalia. Liitteen H kuvista 108, 115, 122 ja 129 nähdään, että OL2-laitokselle MCPR-arvo laskee eri karheuden kasvun funktioilla eniten jakson alussa. Kuvista 107, 114, 121 ja 128 kuitenkin havaitaan, että jakson alussa MCPR-arvo on suurempi kuin jakson lopussa. Lisäksi, kuten luvussa 6.2.3, tietyn ikäluokan CPR-arvon lasku ei välttämättä ole jakson kohdassa, jossa ikäluokan CPR-arvo on alun perin pienemmillään. Tästä ei ole esitetty kuvia, niiden suuren määrän vuoksi.

6.3 Tulosten tarkastelu

Tämän työn laskentaosuudessa tavoitteena oli saada selville, kuinka paljon polttoaineen CPR-arvo voi laskea korroosiotuotteiden kertymisen aiheuttaman polttoainesauvan pinnankarheuden kasvun vuoksi. Yhteenvetona tuloksista voidaan sanoa, että eri ikäisten polttoaine-elementtien CPR-arvot yleisesti laskevat vähemmän, kun kaikilla polttoaineilla on karheutta verrattuna tilanteeseen, jossa vain kyseisellä ikäluokalla on karheutta. Kun yksittäisille polttoaine-elementeille ja ikäryhmille annettiin maksimikarheus, havaittiin, että CPR-arvo laski 0–1 vuotiailla maksimissaan 1 % ja muilla alle 3 %:a. Kuitenkin, kun karheus kasvaa ajan funktiona, CPR:n maksimilaskuksi saatiin 0–1 ja 4–6 vuotiaille noin 1 % ja muille 1,8 %:a. Tällöin todellisuudessa CPR luultavasti laskee 1–6 vuotiailla alle 2 %:a.

Lisäksi rajoittavin CPR-arvo eli koko reaktorin MCPR-arvo laskee todellisuudessa vähemmän kuin mitä sen maksimilaskuksi saatiin, kun vain 0–1 vuotiaille tai 1–2 vuotiaille annettiin karheutta. Kun 0–1 tai 1–2 vuotiaille annettiin karheus 1 μm , ja muut polttoaine-elementit oletettiin sileiksi, MCPR-arvon lasku oli maksimissaan noin 1 %. Kun 1–2 vuotiaille karheutta annettiin 3 μm , lasku oli maksimissaan noin 3 %:a. Kuitenkin, kun karheus kasvaa ajan funktiona, MCPR:n maksimilaskuksi saatiin 1,61 %:a. Tämän perusteella todellisuudessa reaktorin MCPR luultavasti laskee alle 2 %:a.

Pinnankarheuden kasvun aiheuttama lasku CPR-arvoissa voitaisiin mahdollisesti ottaa huomioon esimerkiksi pienimmän sallitun CPR-arvon määrittämisessä (OLMCPR). Saadut CPR-arvojen laskut kuitenkin vaikuttavat vähäisiltä. Lisäksi laskennassa pyrittiin saamaan selville pinnankarheuden aiheuttama maksimivaikutus, jolloin todellisuudessa CPR-arvot luultavasti laskevat vähemmän kuin mitä tulokseksi saatiin. Esimerkiksi SIMULATE-3-ohjelmalle syötettävien lisäkertoimien, joilla kasvatettiin polttoaineiden kitkakertoimia pinnankarheuden huomioimiseksi, määrittämisessä veden yksifaasivirtaukselle Reynoldsin lukuna käytettiin maksimiarvoa, joka arvioitiin olevan 220 000. Todellisuudessa luku on suuruusluokkaa 100 000, jolloin lisäkertoimet ovat hieman pienemmät, mitä laskuissa käytettiin. Tällöin myös CPR-arvot voivat laskea todellisuudessa vähemmän kuin mitä tulokseksi saatiin. Lisäksi pienemmällä pääkiertovirtauksella Reynoldsin luku on pienempi. Tämän työn laskuissa kuitenkin käytettiin samalla Reynoldsin luvulla määritettyjä lisäkertoimia jokaisessa ajopisteessä. Suurin CPR-arvon ja reaktorin

MCPR-arvon lasku saatiin valituista ajopisteistä juuri pienimmällä pääkiertovirtauksella (4000 kg/s), joten todellisuudessa arvot saattavat laskea vähemmän.

Suojakuoren pinnankarheus saattaa myös muuttua niin vähän korroosiotuotteiden kertymisen vuoksi, että karheuden kasvua ei tarvitsisi huomioida CPR-arvojen laskennassa. Suojakuoren pinnankarheuden arvioitiin kasvavan maksimissaan arvoon 3 μm crudin kertymisen vuoksi. Tällöin kaavan (70) mukaan suojakuoren pinta voidaan katsoa olevan veden yksifaasivirtauksessa hydraulisesti sileä, kun Reynoldsin luku on 220 000 ja halkaisija 0,01 m. Tämän perusteella SIMULATE-3:ssa käytetyt sileän pinnan yksifaasikitkakertoimet voitaisiin jopa katsoa olevan tarpeeksi tarkkoja myös polttoaineille, joiden suojakuoren pinta on karhea oksidi- ja crud-kerroksen vuoksi, ja jättää karheuden kasvu huomioimatta.

Tässä työssä lisäkertoimien määrittämisessä kaavassa (82) käytettiin kalibroituja a- ja b-arvoja eikä oletusarvoisia a- ja b-arvoja. Lisäksi laskennassa polttoaineen kitkakertoimen oletettiin kasvavan samassa suhteessa Colebrookin yhtälön (74) kanssa, kun karheus kasvaa. Jos kitkakerrointa olisi muutettu vastaamaan Colebrookin yhtälöstä saatavaa arvoa, polttoaineen kitkakerrointa olisi pitänyt kalibroitujen a- ja b-arvojen kanssa kasvattaa, vaikka pinta olisi ollut sileä. Oletusarvoisten a ja b kanssa puolestaan kitkakerrointa olisi pitänyt laskea pinnan ollessa sileä ja pinnankarheuden ollessa alhainen ($< 2,31 \mu\text{m}$, kun Reynolds 220 000 ja $< 4,22 \mu\text{m}$, kun Reynolds 100 000). Laskennan voisi suorittaa myös siten, että polttoaineen kitkakertoimen muuttaisi vastaamaan Colebrookin yhtälöstä saatavaa kitkakerrointa ja käyttäisi oletusarvoisia a- ja b-arvoja. Oletusarvoisilla a- ja b-arvoilla kuitenkin lisäkertoimen arvo on pieni, jos kitkakerroin muutetaan vastaamaan Colebrookin yhtälöstä saatavaa arvoa. Reynoldsin luvun ollessa 220 000 lisäkerroin olisi 1,026, kun pinnankarheus on 3 μm , ja alle yhden, kun karheus on alle 2,31 μm . Reynoldsin luvulla 100 000 lisäkerroin olisi alle yhden, kun karheus on alle 4,22 μm . Näillä lisäkertoimilla mahdollinen CPR-lasku saattaa olla pienempää kuin mitä tulokseksi saatiin.

Lisäksi tässä työssä tehtiin muitakin oletuksia, jotka ovat voineet vaikuttaa tuloksiin. Esimerkiksi crudin oletettiin olevan kertynyt tasaisesti polttoainesauvoille ja pinnankarheuden olevan sama koko polttoainesauvan pituudella. Tosiasiassa crudia ei kerry tasaisesti polttoainesauvalle, jolloin karheuskaan ei välttämättä ole sama koko sauvan pituudella. Laskuissa myös otettiin huomioon vain polttoainesauvojen karheuden kasvu eikä vesisauvojen tai välitukien mahdollista karheuden kasvua huomioitu. Crudin aiheuttamasta pinnankarheuden kasvusta ei ollut tietoa saatavilla, joten crudille arvioitiin maksimikarheus kirjallisuuden avulla ja määrittämällä polttoainesauvan poikkileikkauskuvista pinnankarheudelle arvoja. Tarkempien tuloksien saamiseksi tulisi huomioida, että crudia ei kerry tasaisesti, ja selvittää tarkemmin crudin maksimikarheus sekä karheuden kasvu ajan funktiona.

Virhettä saattoi aiheutua myös siitä, että reaktorisydämen simuloinnissa käytetyt lämmönsiirtokorrelaatiot ja CPR-korrelaatiot eivät välttämättä ole täysin täsmällisiä, kun suo-
jakuoren pinnalle on kertynyt oksidia ja crudia. Käytettävien korrelaatioiden luotettavuuden arvioimiseksi tulisi laskenta suorittaa korrelaatioilla, jotka olisi määritelty, kun suo-
jakuoren pinnalla on oksidia ja crudia. Lisäksi laskennassa tulisi huomioida karheen pin-
nan mahdollisesti lisäämä nesteen kulkeutuminen höyryfaasiin ja sen vaikutus CPR-ar-
voihin.

Laskenta suoritettiin vain OL1-laitoksen 39. käyttöjaksolle ja OL2-laitoksen 37. käyttö-
jaksolle. Jotta tuloksista saataisiin luotettavimmat, tulisi laskenta suorittaa muillekin
käyttöjaksoille. Saatuja tuloksia olisi myös hyvä verrata muissa tutkimuksissa saatuihin
CPR-arvon laskuihin. Tässä työssä kirjallisuudesta yritettiin etsiä tietoa korroosiotuottei-
den vaikutuksesta CPR-arvoihin kiehutusvesilaitoksilla, mutta tietoa ei löydetty.

7. YHTEENVETO

Tämän työn tavoitteena oli selvittää, vaikuttaako säteilytyksen aiheuttama oksidi- ja crud-kerroksen muodostuminen polttoainesauvan suojakuoren ja jäähdytteen väliseen lämmönsiirtoon sekä polttoaineen lämmönsiirtokriisiin. Tätä tutkittiin kirjallisuuden avulla sekä laskennallisesti suorittamalla simulointeja Studsvik Scandpowerin SIMULATE-3-sydänlaskentaohjelmalla. Laskentaosuudessa tavoitteena oli saada selville, kuinka paljon polttoaineen CPR-arvo voi laskea korroosiotuotteiden aiheuttaman suojakuoren pinnankarheuden kasvun vuoksi.

Kirjallisuuden avulla saatiin selville, että oksidi- ja crud-kerros kasvattavat lämpövastusta, jolloin lämmönjohtuminen polttoainesauvassa heikkenee ja suojakuoren lämpötila voi nousta. Crud-kerros kuitenkin lisää suojakuoren lämpötilaa vain harvoin tai lisää sitä mahdollisesti vain vähän. Lisäksi OL1- ja OL2- laitoksilla crudin rautapitoisuus on suuri, mikä on edullista lämmönsiirron kannalta.

Huokoisen rakenteensa vuoksi crud voi jopa tehostaa lämmönsiirtymistä. Crud imee itseensä vettä, joka höyrystyy ja kulkeutuu pois crudissa olevia kanavia pitkin. Tällöin höyry pääsee nopeasti pois crudista ja kiehuminen tehostuu. Lisäksi oksidi- ja crud-kerros kasvattavat suojakuoren pinnankarheutta, mikä lisää kuplien ydintymispaikkoja ja parantaa siten lämmönsiirtymistä. Pinnankarheuden kasvu kuitenkin saattaa lisätä nesteen kulkeutumista höyryfaasiin, jolloin nestekalvo ohenee ja lämmönsiirtokriisi voi aikaistua. Karheuden kasvu myös lisää kitkaa, jolloin painehäviö polttoaine-elementin yli kasvaa. Jotta kaikkien reaktorissa olevien polttoaine-elementtien painehäviö olisi sama, karheuden kasvu voi vähentää polttoainesauvoille menevää jäähdytevirtausta ja aikaistaa siten lämmönsiirtokriisiä. Lisäksi karhealle pinnalle lämmönsiirtokorrelaatioiden, jotka on määritetty sileälle pinnalle, luotettavuus voi muuttua.

Kun pinnankarheuden vaikutusta polttoaine-elementtien CPR-arvoihin ja aktiivivirtauksiin tutkittiin, havaittiin, että polttoaine-elementit vaikuttavat toinen toisiinsa. Karheilla polttoaine-elementeillä aktiivivirtaus ja CPR-arvo laskevat, mutta aktiivivirtauksen väheneminen joillain polttoaine-elementeillä voi kuitenkin kasvattaa joidenkin muiden aktiivivirtausta sekä siten CPR-arvoa. Esimerkiksi, vaikka kaikille polttoaine-elementeille annettiin karheutta, joillain aktiivivirtaus ja CPR-arvo saattoivat kasvaa. Aktiivivirtauksen väheneminen joillain polttoaine-elementeillä voi kuitenkin kasvattaa myös ohivirtausta. Lisäksi havaittiin, että aktiivivirtaus ja CPR-arvot muuttuivat enemmän valituista ajopisteistä pienemmällä teholla ja pääkiertovirtauksella.

Jotta saatiin selville, kuinka paljon karheus voi maksimissaan laskea polttoaineen CPR-arvoa, tarkasteltiin CPR-arvon muuttumista kolmessa ajopisteessä, kun yhdelle ikäryh-

mälle annettiin sen maksimikarheus ja oletettiin muut polttoaine-elementit sileiksi. Lisäksi tarkasteltiin CPR-arvon muuttumista, kun yksittäisille polttoaine-elementeille annettiin maksimikarheus. 0–1 vuotiaille polttoaine-elementeille määritettiin olevan maksimissaan karheutta $1\ \mu\text{m}$ ja 1–6 vuotiailla $3\ \mu\text{m}$. Tulokseksi saatiin, että 0–1 vuotiailla CPR-arvo laskee maksimissaan 1 %:n ja muilla polttoaine-elementeillä alle 3 %:a.

Maksimivaikutuksen lisäksi arvioitiin, kuinka paljon CPR-arvot muuttuvat todellisessa tilanteessa, kun kaikille polttoaine-elementeille annetaan karheusarvo sen mukaan, miten karheus kasvaa ajan funktiona. Todellista karheuden kasvun funktiota ei saatu selville, joten kasvulle annettiin erilaisia funktioita. Funktioissa karheus kasvoi määritettyyn maksimikarheuteen eli arvoon $3\ \mu\text{m}$. Tulokseksi saatiin, että 0–1 ja 4–6 vuotiailla CPR-arvo laskee maksimissaan 1 %:n verran ja muilla alle 2 %:a. Tämän perusteella CPR-arvo laskee maksimissaan 0–1 vuotiailla 1 % ja 1–6 vuotiailla 3 %:a, mutta todellisuudessa 1–6 vuotiaiden lasku on luultavasti alle 2 %:a.

Kun karheuden vaikutusta koko reaktorin MCPR-arvoon tutkittiin, havaittiin, että 0–1 vuotiaiden karheus pienentää yleisesti reaktorin MCPR-arvoa, mutta saattaa kuitenkin jakson alussa kasvattaa sitä hieman. 1–2 vuotiaiden karheus saattaa vähentää MCPR-arvoa jakson alussa, mutta jakson lopussa kasvattaa. Muiden ikäluokkien karheus voi kasvattaa arvoa. Kun 0–1 tai 1–2 vuotiaille annettiin karheutta $1\ \mu\text{m}$, MCPR-arvon lasku oli maksimissaan noin 1 %. Kun 1–2 vuotiaille annettiin karheutta $3\ \mu\text{m}$, lasku on maksimissaan noin 3 %:a. Kuitenkin, kun karheus kasvaa ajan funktiona, MCPR-arvon laskuksi saatiin maksimissaan 1,61 %:a. Tällöin todellisuudessa reaktorin MCPR luultavasti laskee alle 2 %:a.

Saatu pinnankarheuden vaikutus polttoaine-elementtien CPR-arvoihin voitaisiin mahdollisesti ottaa huomioon esimerkiksi pienimmän sallitun CPR-arvon määrittämisessä. Arvojen lasku vaikuttaa kuitenkin vähäiseltä ja todellisuudessa lasku voi olla vielä pienempää, sillä tässä työssä pyrittiin arvioimaan pinnankarheuden aiheuttama maksimivaikutus CPR-arvoihin. Laskut voisikin olla hyvä suorittaa eri lähtöarvoilla ja -oletuksilla, joita työssä käytettiin. Laskennassa esimerkiksi käytettiin SIMULATE-3-ohjelmalle syötettävien lisäkertoimien määrittämiseksi veden yksifaasivirtaukselle Reynoldsin luvulle maksimiarvoa. Laskut voisi olla hyvä suorittaa myös pienemmällä Reynoldsin luvulla todennukaisempien tulosten saamiseksi. Lisäksi tulisi huomioida, että Reynoldsin luku muuttuu eri ajopisteille. Tässä työssä käytettiin samaa lukua kaikille ajopisteille, jolloin pienemmälle pääkiertovirtaukselle saadut CPR-arvon muutokset voivat olla todennukaista suuremmat. Lisäksi laskennan voisi suorittaa siten, että polttoaineen kitkakertoimen muuttaisi vastaamaan Colebrookin yhtälöstä saatavaa kitkakerrointa ja käyttäisi oletusarvoisia a- ja b-arvoja. Tässä työssä käytettiin kalibroituja a- ja b-arvoja ja kitkakertoimen oletettiin kasvavan samassa suhteessa Colebrookin yhtälön (74) kanssa, kun karheus kasvaa. Oletusarvoisilla a- ja b-arvoilla kuitenkin lisäkertoimen arvo on pieni, jos kitkakerroin muutetaan vastaamaan Colebrookin yhtälöstä saatavaa arvoa. Tällöin CPR-arvot luultavasti laskevat vähemmän kuin mitä tulokseksi saatiin.

Luotettavampien tulosten saamiseksi laskennassa tulisi myös huomioida mahdollinen vesisauvojen ja välitukien karheuden kasvu sekä se, että crud ei kerry tasaisesti polttoainesauvan pinnalle, jolloin pinnankarheus ei välttämättä ole sama koko sauvan pituudella. Pinnankarheuden mahdollisesti lisäämä nesteen kulkeutuminen höyryfaasiin sekä karheuden aiheuttama vaikutus reaktorisydämen simuloinnissa käytettäviin lämmönsiirto-korrelaatioiden ja CPR-korrelaatioiden luotettavuuteen tulisi myös ottaa huomioon. Lisäksi tulisi selvittää tarkemmin crudin maksimikarheus sekä karheuden kasvu ajan funktiona. Tulosten luotettavuuden kannalta olisi myös hyvä suorittaa laskenta muillekin käyttöjaksoille kuin OL1-laitoksen 39. käyttöjaksolle ja OL2-laitoksen 37. käyttöjaksolle.

Suojakuoren pinnankarheus saattaa kuitenkin muuttua niin vähän korroosiotuotteiden kertymisen vuoksi, että polttoainessauvan pinta voidaan katsoa olevan hydraulisesti sileä veden yksifaasivirtauksessa. Tällöin SIMULATE-3:ssa käytetyt sileän pinnan yksifaasikitkakertoimet voitaisiin jopa katsoa olevan tarpeeksi tarkkoja myös polttoaineille, joiden suojakuoren pinta on karhea oksidi- ja crud-kerroksen vuoksi, ja jättää karheuden kasvu huomioimatta.

LÄHTEET

- Akimoto, H., Anoda, Y., Takase, K., Yoshida, H., Tamai, H. (2016). Nuclear Thermal Hydraulics. Springer. 458 p.
- Allen, T. R., Konings, R. J. M., Motta, A. T. (2012). Corrosion of Zirconium Alloys. Comprehensive Nuclear Materials. Vol. 5. pp. 49–68.
- Awad, M. M., Muzychka, Y. S. (2005). Bounds on two-phase flow part I - Frictional pressure gradient in circular pipes. American Society of Mechanical Engineers. Vol. 261. pp. 813–821.
- Buongiorno, J. (2014). Can Corrosion and CRUD Actually Improve Safety Margins in LWRs?. Annals of Nuclear Energy. Vol 63. pp. 9–21.
- Chen, J. (2000). On the Interaction between Fuel Crud and Water Chemistry in Nuclear Power Plants. Swedish Nuclear Power Inspectorate (SKI). 36 p.
- Chen, J. C. (1966). A Correlation for Boiling Heat Transfer to Saturated Fluids in Convective Flow. Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development. Vol. 5 (3). pp. 322–329.
- Chisholm, D. (1973). Pressure Gradients Due to Friction During the Flow of Evaporation Two-Phase Mixtures in Smooth Tubes and Channels. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 16. pp. 347–358.
- Cinosi, N., Walker, S. P. (2016). CFD Analysis of Localized Crud Effects on the Flow of Coolant in Nuclear Rod Bundles. Nuclear Engineering and Design. Vol. 305. pp. 28–38.
- Colebrook, C. F. (1939). Turbulent Flow in Pipes, with Particular Reference to the Transition Region Between the Smooth and Rough Pipe Laws. Journal of the Institution of Civil Engineers. Vol. 11(4). pp. 133–156.
- Collier, J. G., Thome, J. R. (1994). Convective Boiling and Condensation. Oxford University Press. 640 p.
- Corrosion of Zirconium Alloys in Nuclear Power Plants. (1993). International Atomic Energy Agency (IAEA). 177 p.
- Covington, L. J. (2002). SIMULATE-3, Advanced Three-Dimensional Two-Group Reactor Analysis Code, Chapter 11: BWR. User's Manual. Studsvik Scandpower. 44 p.

- Coyle, C., Phillips, B., Lowder, S., Buongiorno, J., McKrell, T. (2015). Synthesis of CRUD and Its Effect on Pool and Subcooled Flow Boiling. Massachusetts Institute of Technology. 104 p.
- Cronin, J.T., Smith, K.S., Ver Planck, D.M. (1995a). SIMULATE-3 Methodology, Advanced Three-Dimensional Two-Group Reactor Analysis Code, Chapter 1: Introduction. Studsvik of America, Inc. 2 p.
- Cronin, J.T., Smith, K.S., Ver Planck, D.M. (1995b). SIMULATE-3 Methodology, Advanced Three-Dimensional Two-Group Reactor Analysis Code, Chapter 3: Thermal-Hydraulic Models. Studsvik of America, Inc. 38 p
- Fredriksson, E. (2016). Olkiluoto 1 – Crud sampling and analysis 2016. Westinghouse Electric Sweden AB. 48 p. Julkaisematon materiaali.
- Gadelmawla E. S., Koura, M. M., Maksoud T. M. A., Elewa I. M., Soliman, H. H. (2002). Roughness Parameters. Journal of Material Processing Technology. Vol. 123(1). pp. 133–145.
- Genić, S., Arandjelović, I., Kolendić, P., Jarić, M., Budimir, N., Genić, V. (2011). A Review of Explicit Approximations of Colebrook's Equation. Faculty of Mechanical Engineering. Vol. 39 (2). pp. 67–71.
- GEXL17 Correlation for GNF2 Fuel. Chapter 5: Critical Power Correlation. NEDO-33292. Revision 1. (2007). 21 p.
- Glasstone, S., Sesonske, A. (1994). Nuclear Reactor Engineering. Springer Science & Business Media. 381 p.
- Hakala, J. (2018). Energiavuosi 2017 - Sähkö. Energiateollisuus. Saatavilla (viitattu 16.3.2018): https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/energiavuosi_2017_-_sahko.html#material-view
- Hynönen, V. (2011). Calibrated One-Phase Friction Factors for SIMULATE-3 and SIMULATE-3K. Teollisuuden Voima Oyj (TVO). 19 s. TVO:n sisäinen dokumentti.
- Hämäläinen, T. (2005). SIMULATE-3K:n kelpoistaminen Olkiluodon kiehutusvesireaktoreille. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto (TTY). 94 s.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S. (2006). Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons. 1024 p.
- Kakaç, S., Bergles, A. E., Fernandes, E. O. (1988). Two-Phase Flow Heat Exchangers: Thermal-Hydraulic Fundamentals and Design. Kluwer Academic Publishers. 1099 p.

Lahey, R. T., Moody, F. J. (1993). The Thermal Hydraulics of a Boiling Water Nuclear Reactor. American Nuclear Society. 631 p.

Lamarsh, J. R., Baratta, A. J. (2001). Introduction to Nuclear Engineering. Prentice Hall. 783 p.

Lewis, B. J., Onder, E. N., Prudil, A. A. (2017). Fundamentals of Nuclear Engineering. John Wiley & Sons. 984 p.

Lienhard, J. H. V, Lienhard, J. H. IV. (2017). A Heat Transfer Textbook. Phlogiston Press. 757 p.

Michelsson, L. (2016). KPA-varasto, arvio käytetyn polttoaineen CRUD-määrästä ja aktiivisuudesta. Teollisuuden Voima Oyj (TVO). 8 s. TVO:n sisäinen dokumentti.

Michelsson, L., Leskelä, E. (2017). Yhteenveto TVO:ssa suoritetuista polttoainetarkastuksista ja niiden tuloksista. Teollisuuden Voima Oyj (TVO). 37 s. TVO:n sisäinen dokumentti.

Motta, A. T., Couet, A., Comstock, R. J. (2015). Corrosion of Zirconium Alloys Used for Nuclear Fuel Cladding. Annual Review of Materials Research Vol. 45. pp. 311–343.

Murty, K. L. (2013). Material's Ageing and Degradation in Light Water Reactors. Woodhead Publishing (WP). 440 p.

NEA/CSNI/R(99)25. (2000). Fuel Safety Criteria Technical Review. NEA (Nuclear Energy Agency). 49 p.

Ohje YVL B.4, Ydinpolttoaine ja reaktori. (2013). Perustelumuistio. Säteilyturvakeskus (STUK). 3 s. Saatavissa (viitattu 16.3.2018): <https://www.stuklex.fi/fi/YVLB.4-perust.pdf>

OL1 ja OL2. Teollisuuden Voima Oyj (TVO). Saatavissa (viitattu 16.3.2018): <https://www.tvo.fi/ol1ol2>

OL1&OL2 Ydinvoimalaitosyksiköt. (2013). Teollisuuden Voima Oyj (TVO). 58 s.

Paajanen, M. (2017). OL1-Cycle 39 (2017–2018) Transient Analysis. Teollisuuden Voima Oyj (TVO). 44 p. TVO:n sisäinen dokumentti.

Raiko, R. (2014). Ydinvoimalaitokset, luentomoniste. Tampereen teknillinen yliopisto (TTY).

Ranta-Puska, K., Knuutila, A. (2014). OL1/OL2 – Fuel Assemblies – Final Safety Analysis Report. TVO:n sisäinen dokumentti. Teollisuuden Voima Oyj (TVO). 26 s.

Rohsenow, W. M., Hartnett, J. P., Cho, Y. I. (1998). Handbook of Heat Transfer. Chapter 14: Condensation. McGraw-Hill. 63 p.

Salomaa, S., Sandberg, J., Ikäheimonen, T. K., Pöllänen, R., Weltner, A., Pukkila, O., Paile, W., Nyberg, H., Marttila, O. J., Lehtinen, J., Karvinen, H. (2004). Säteily- ja ydinturvallisuus -kirjasarja: Ydinturvallisuus. Säteilyturvakeskus (STUK). 418 s.

Serth, R. W., Lestina, T. G. (2014). Process Heat Transfer: Principles, Applications and Rules of Thumb. Academic Press. 609 p.

Tammela, M. (2017). OL1 – Reaktorisydämen valvonnassa sovellettavat termiset rajoitukset 39. käyttöjaksolla. Teollisuuden Voima Oyj (TVO). 7 s. TVO:n sisäinen dokumentti.

Todreas, N. E., Kazimi, M. S. (2011). Nuclear Systems Volume 1: Thermal Hydraulic Fundamentals. CRC Press. 1034 p.

Tong, L. S., Tang, Y. S. (1997). Boiling Heat Transfer and Two-Phase Flow. Taylor & Francis. 542 p.

Tong, L. S., Weisman, J. (1996). Thermal Analysis of Pressurized Water Reactors. American Nuclear Society. 748 p.

Turvallisuusperiaatteet. Säteilyturvakeskus (STUK). Saatavissa (viitattu 16.3.2018): <http://www.stuk.fi/aiheet/ydinvoimalaitokset/turvallisuusperiaatteet>

TVO yhtiönä. Teollisuuden Voima Oyj (TVO). Saatavissa (viitattu 16.3.2018): <https://www.tvo.fi/yhtio>

Weisman, J. (1959). Heat Transfer to Water Flowing Parallel to Tube Bundles. Nuclear Science and Engineering. Vol. 6(1). pp. 78–79.

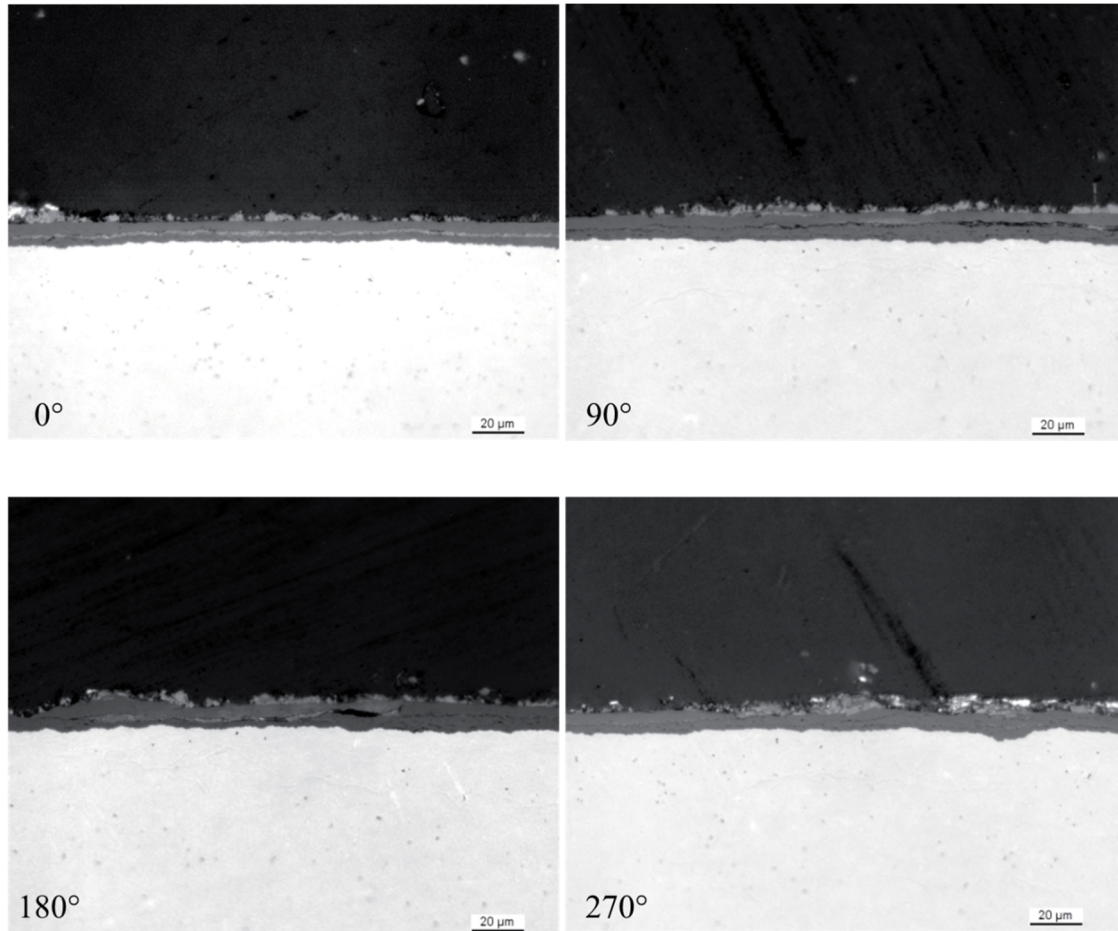
Wilson, W., Comstock, R.J. (1999). Potential Impacts of Crud Deposits on Fuel Rod Behaviour on High Powered PWR Fuel Rods. International Atomic Energy Agency (IAEA). General Studies of Nuclear Reactors. Vol. 30(50). pp. 205–212.

Ydinsähköä Olkiluodosta. (2012). Teollisuuden Voima Oyj (TVO). 27 s.

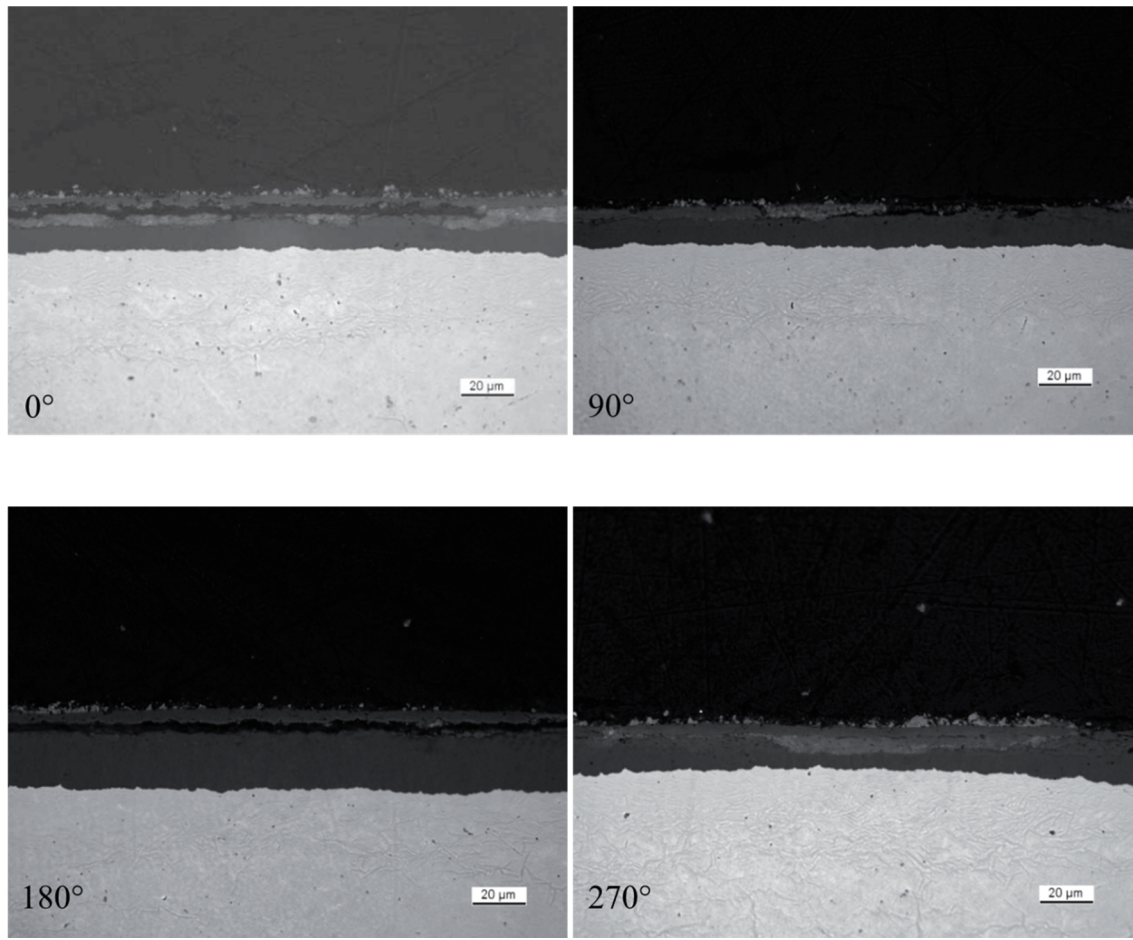
Ydinvoima. Energiateollisuus. Saatavissa (viitattu 16.3.2018): https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/ydinvoima

YVL B.4. (2013). Ydinpolttoaine ja reaktori. Säteilyturvakeskus (STUK). 10 s.

**LIITE A: ERÄÄN 5 KÄYTTÖJAKSOA REAKTORISSA OLLEEN
POLTTOAINESAUVAN POIKKILEIKKAUSKUVIA ERI KORKEUK-
SILTA JA KULMISTA**



Kuva 25. Erään polttoainesauvan poikkileikkauskuvia korkeudelta 2795 mm eri kulmista.



Kuva 26. *Erään polttoainesauvan poikkileikkauskuvia korkeudelta 1430 mm eri kulmista.*

LIITE B: OL2C37 - CPR:N JA AKTIIVIVIRTAUKSEN MUUTOKSET, KUN YHDELLÄ IKÄLUOKALLA ON KARHEUTTA JA MUUT OVAT SILEITÄ (0–1 V. 1 μM JA MUUT 3 μM)

I/J	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1											9.110 1.000	7.552 1.000	7.138 1.000	7.022 1.000	7.946 1.000	9.643 1.000										
2										6.356 1.000	4.923 1.000	4.289 1.000	3.989 1.000	4.071 1.000	4.215 1.000	5.561 1.000	6.868 1.000									
3												3.762 1.000	3.031 1.000	2.377 1.000	2.739 1.000	2.493 1.000	2.378 1.000	3.858 1.000	4.267 1.000	4.741 1.000	6.208 1.000	8.783 1.000				
4																										
5																										
6																										
7																										
8																										
9																										
10																										
11																										
12																										
13																										
14																										
15																										
16																										
17																										
18																										
19																										
20																										
21																										
22																										
23																										
24																										
25																										
26																										

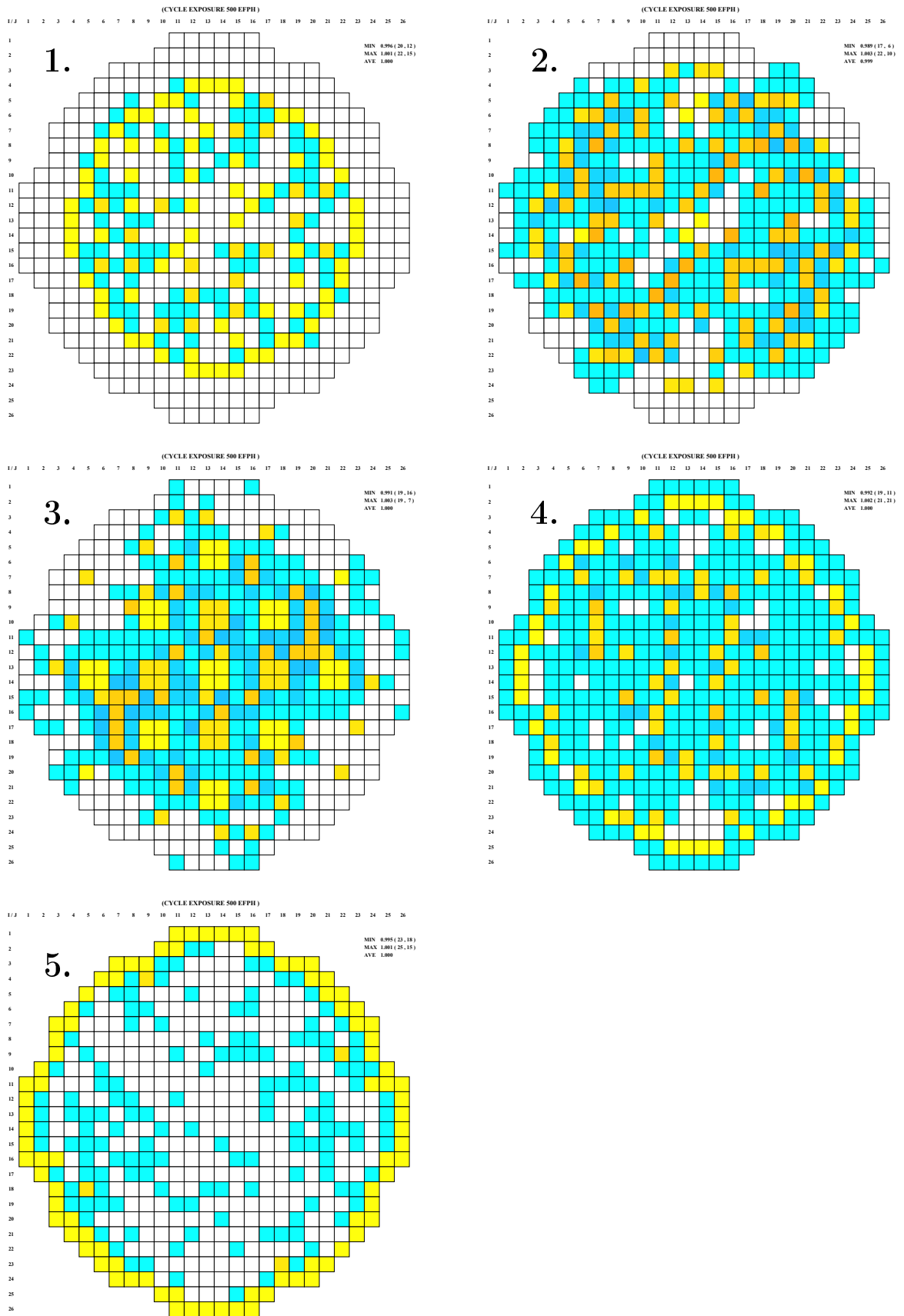
MIN 0.996 (20, 12)
MAX 1.001 (22, 15)
AVE 1.000

Kuva 27. Nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään, kun 0–1 vuotiailla on karheutta 1 μm (2500 MW, 7650 kg/s). Kuvassa yksi neliö kuvaa yhtä polttoaine-elementtiä. Neliöissä ylin arvo on kyseisen polttoaine-elementin CPR-arvo, kun kaikki polttoaine-elementit on oletettu sileiksi. Keskimääräinen arvo vastaa CPR-arvoa, kun 0–1 vuotiailla on asetettu 1 μm karheus ja muut on oletettu sileiksi. Alin arvo kuvaa näiden suhdetta (karhea tapaus/sileä tapaus). CPR-arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvua sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.

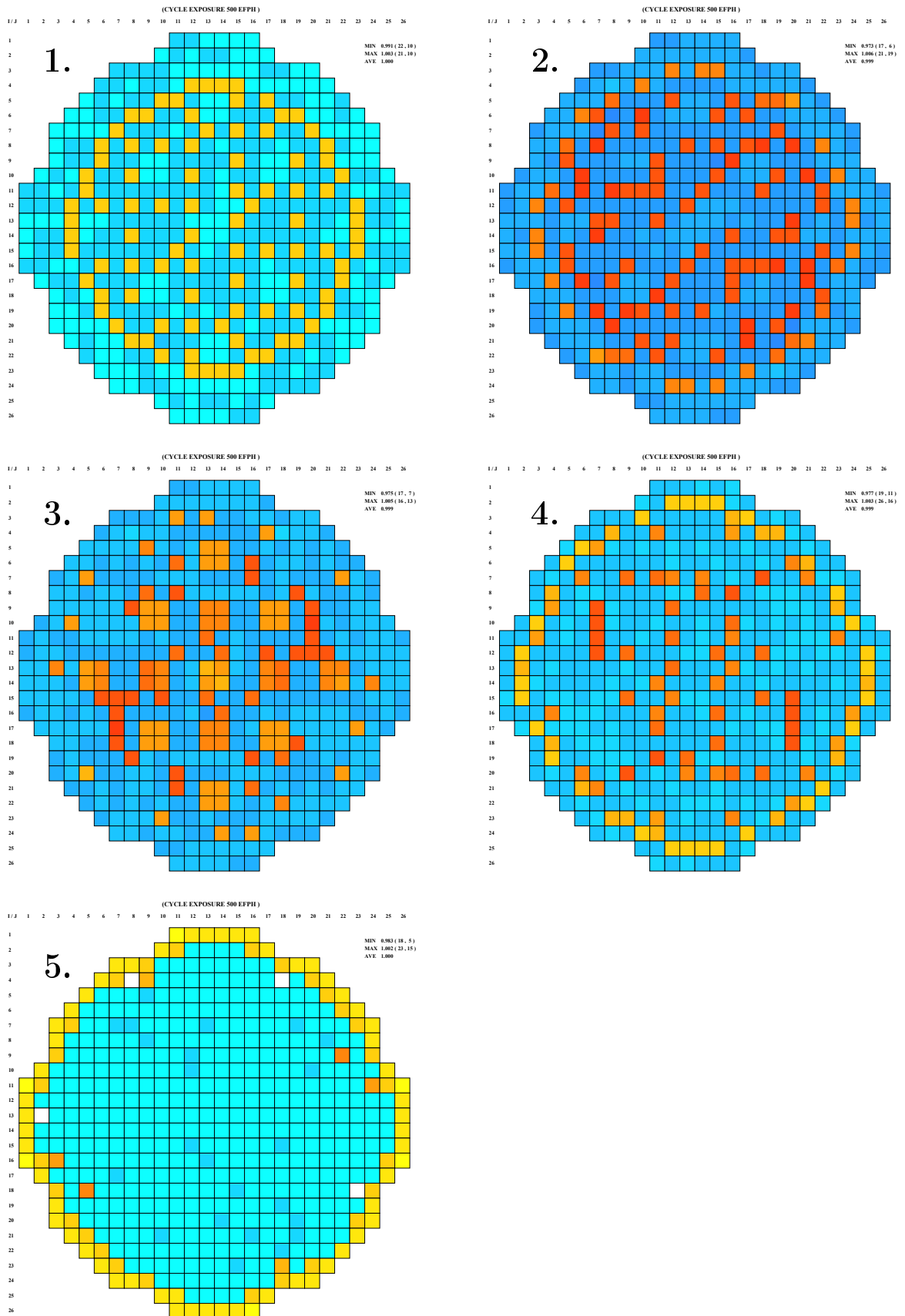
(CYCLE EXPOSURE 500 EFPH)																											
1/J	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
1																											
2																											
3																											
4																											
5																											
6																											
7																											
8																											
9																											
10																											
11																											
12																											
13																											
14																											
15																											
16																											
17																											
18																											
19																											
20																											
21																											
22																											
23																											
24																											
25																											
26																											

MIN 0.991 (22, 10)
 MAX 1.003 (21, 10)
 AVE 1.000

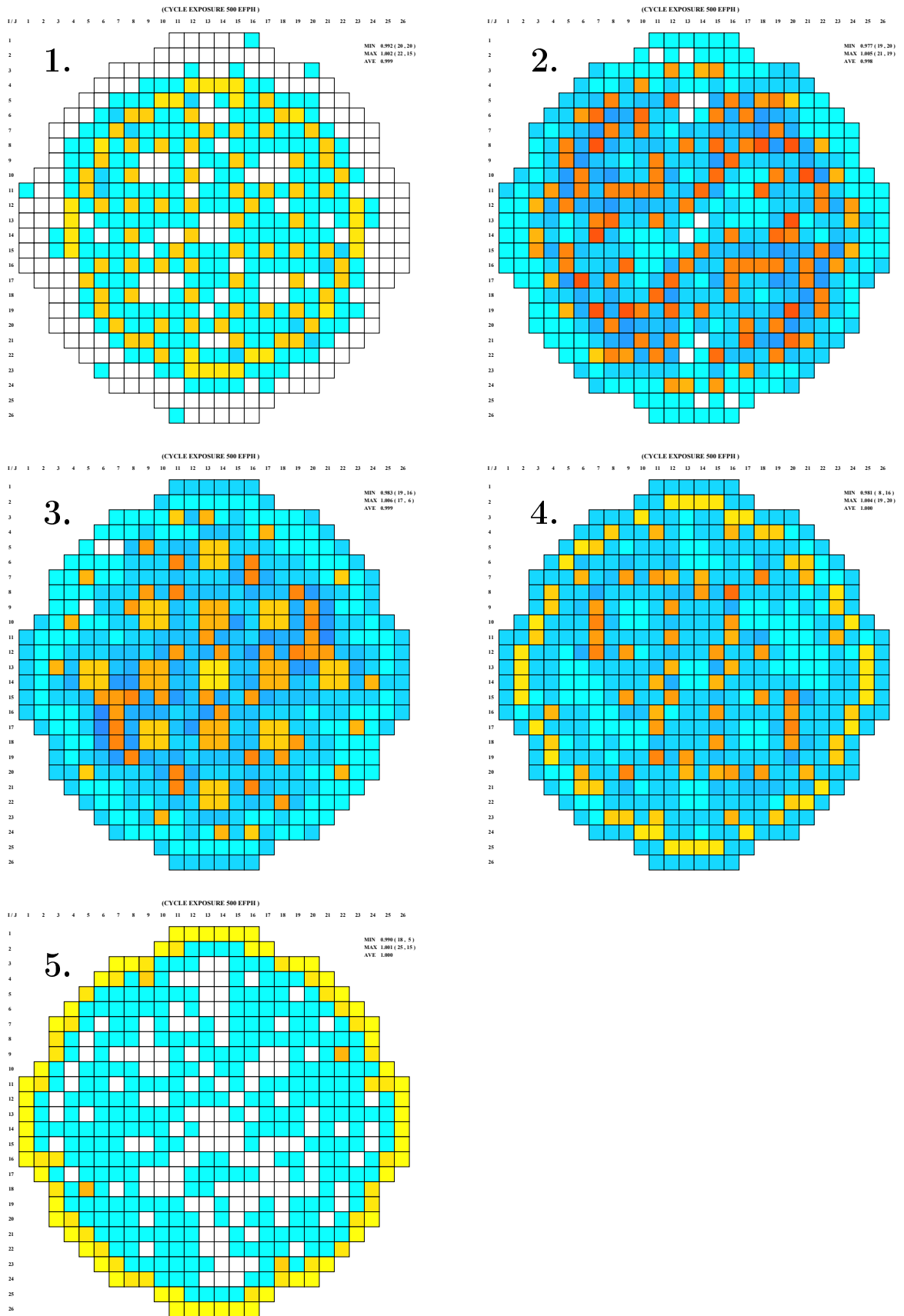
Kuva 28. Nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen, kun 0–1 vuotiailla on karheutta 1 μm (2500 MW, 7650 kg/s). Kuvassa yksi neliö kuvaa yhtä polttoaine-elementtiä. Neliöissä ylin arvo on kyseisen polttoaine-elementin aktiivivirtauksen arvo, kun kaikki polttoaine-elementit on oletettu sileiksi. Keskimääräinen arvo vastaa aktiivivirtauksen arvoa, kun 0–1 vuotiaille on asetettu 1 μm karheus ja muut on oletettu sileiksi. Alin arvo kuvaa näiden suhdetta (karhea tapaus/sileä tapaus). Aktiivivirtauksen laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvaa sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.



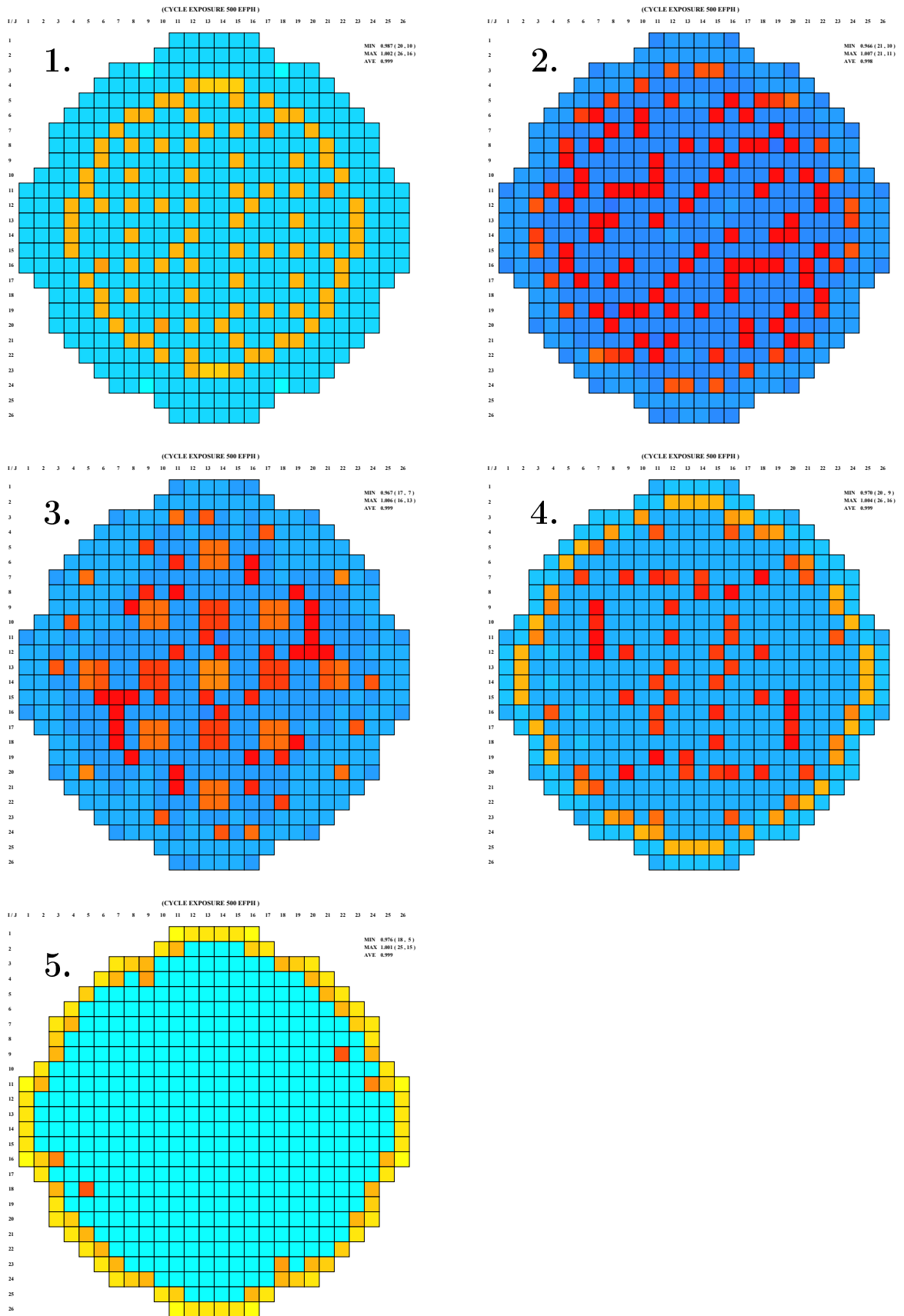
Kuva 29. Nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään jakson kohdassa 500 EFPH, kun yhdellä ikäluokalla on karheutta ja muut ovat sileitä. Kuvat vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas: 0–1 vuotiailla on karheutta 1 μm , 1–2 vuotiailla 3 μm , 2–3 vuotiailla 3 μm , 3–4 vuotiailla 3 μm ja 4–6 vuotiailla 3 μm (2500 MW, 7650 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvua sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.



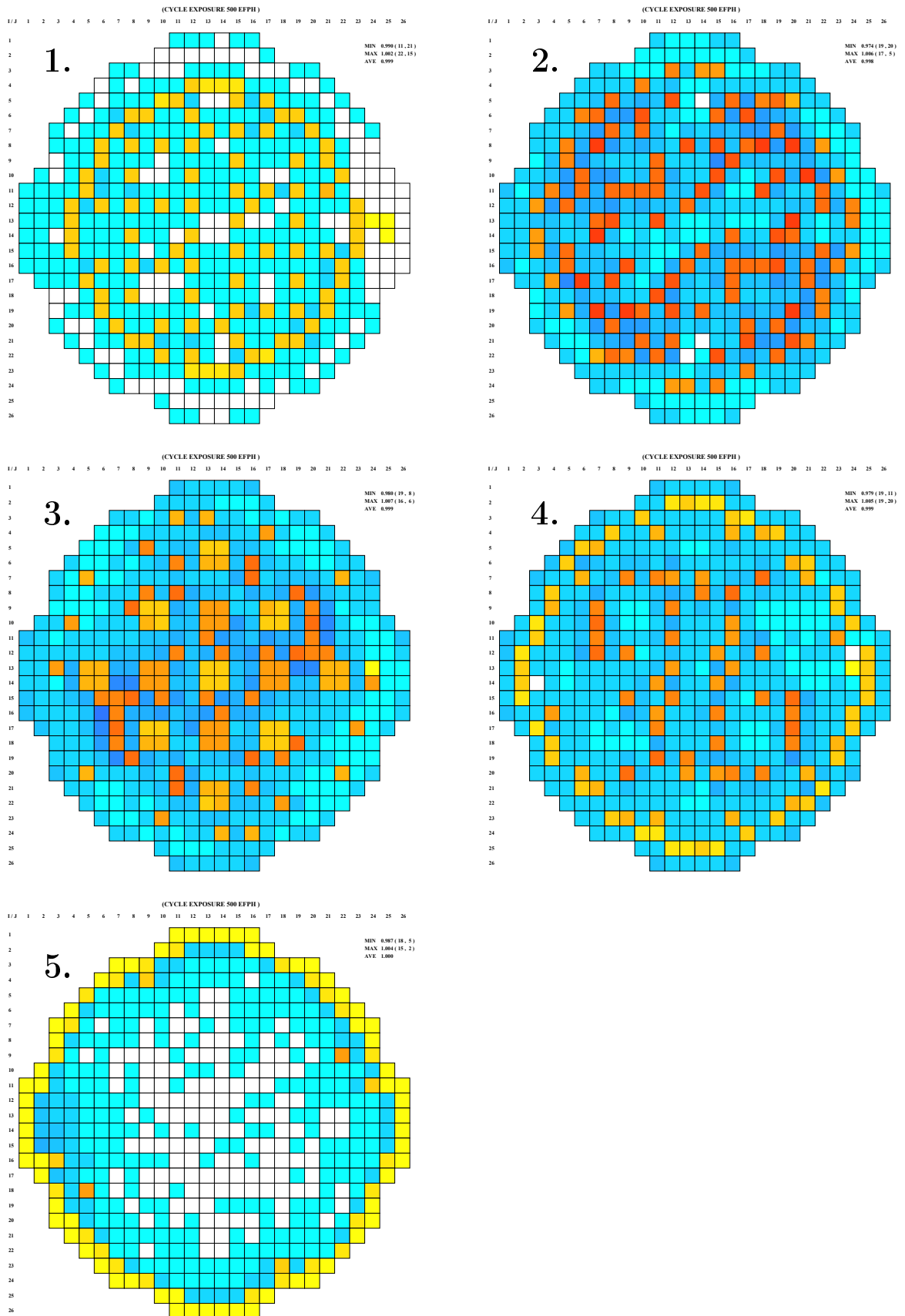
Kuva 30. Nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen jakson kohdassa 500 EFPH, kun yhdellä ikäluokalla on karheutta ja muut ovat sileitä. Kuvat vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas: 0–1 vuotiailla on karheutta 1 μm , 1–2 vuotiailla 3 μm , 2–3 vuotiailla 3 μm , 3–4 vuotiailla 3 μm ja 4–6 vuotiailla 3 μm (2500 MW, 7650 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvua sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.



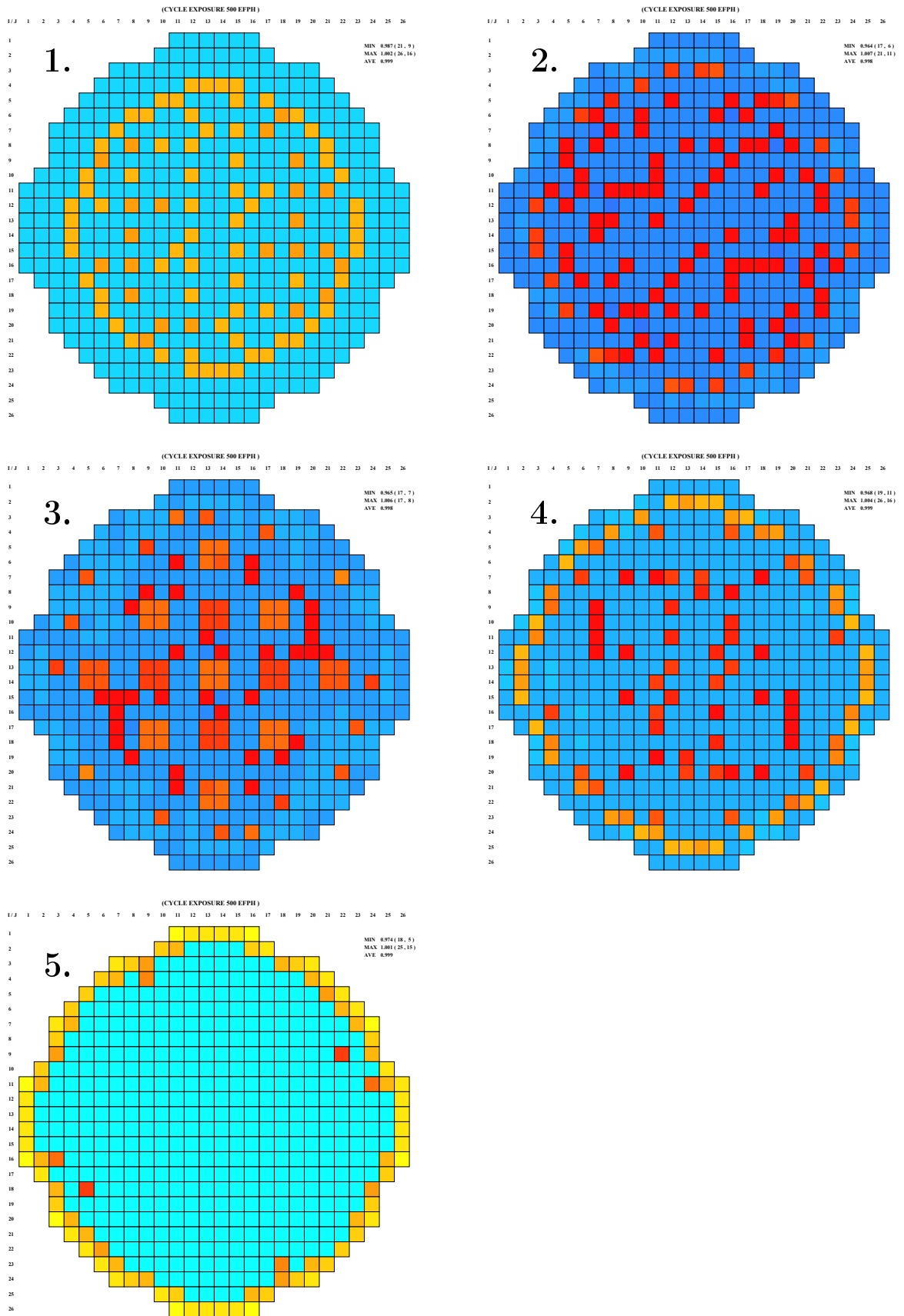
Kuva 31. Nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään jakson kohdassa 500 EFPH, kun yhdellä ikäluokalla on karheutta ja muut ovat sileitä. Kuvat vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas: 0–1 vuotiailla on karheutta $1\ \mu\text{m}$, 1–2 vuotiailla $3\ \mu\text{m}$, 2–3 vuotiailla $3\ \mu\text{m}$, 3–4 vuotiailla $3\ \mu\text{m}$ ja 4–6 vuotiailla $3\ \mu\text{m}$ (1900 MW, 4600 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvua sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.



Kuva 32. Nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen jakson kohdassa 500 EFPH, kun yhdellä ikäluokalla on karheutta ja muut ovat sileitä. Kuvat vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas: 0–1 vuotiailla on karheutta $1\ \mu\text{m}$, 1–2 vuotiailla $3\ \mu\text{m}$, 2–3 vuotiailla $3\ \mu\text{m}$, 3–4 vuotiailla $3\ \mu\text{m}$ ja 4–6 vuotiailla $3\ \mu\text{m}$ (1900 MW, 4600 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvua sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.



Kuva 33. Nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään jakson kohdassa 500 EFPH, kun yhdellä ikäluokalla on karheutta ja muut ovat sileitä. Kuvat vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas: 0–1 vuotiailla on karheutta 1 μm , 1–2 vuotiailla 3 μm , 2–3 vuotiailla 3 μm , 3–4 vuotiailla 3 μm ja 4–6 vuotiailla 3 μm (1750 MW, 4000 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvua sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.



Kuva 34. Nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen jakson kohdassa 500 EFPH, kun yhdellä ikäluokalla on karheutta ja muut ovat sileitä. Kuvat vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas: 0–1 vuotiailla on karheutta 1 μm , 1–2 vuotiailla 3 μm , 2–3 vuotiailla 3 μm , 3–4 vuotiailla 3 μm ja 4–6 vuotiailla 3 μm (1750 MW, 4000 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvua sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.

LIITE C: OL2C37 - CPR:N JA AKTIIVIVIRTAUKSEN MUUTOKSET, KUN YKSITTÄISILLÄ POLTTOAINE-ELEMENTEILLÄ ON KARHEUTTA

Ryhmän 1 (ks. kuva 21) polttoaine-elementeillä 1 μm karheus

(CYCLE EXPOSURE 500 EFPH)																												
I/J	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26		
1												9.110 1.000	7.552 1.000	7.138 1.000	7.022 1.000	7.946 1.000	9.643 1.000											
2										6.356 1.000	4.923 1.000	4.289 1.000	3.989 1.000	4.071 1.000	4.215 1.000	5.561 1.000	6.868 1.000											
3												8.327 1.000	6.254 1.000	4.739 1.000	3.762 1.000	3.031 1.000	2.377 1.000	2.739 1.000	2.493 1.000	2.378 1.000	3.858 1.000	4.267 1.000	4.741 1.000	6.208 1.000	8.783 1.000			
4													6.437 1.000	5.072 1.000	3.705 1.000	3.260 1.000	2.364 1.000	2.717 1.000	2.084 1.000	2.125 1.000	2.146 1.000	2.106 1.000	2.849 1.000	2.789 1.000	3.132 1.000	3.615 1.000	4.959 1.000	7.026 1.000
5																												
6																												
7																												
8																												
9																												
10																												
11																												
12																												
13																												
14																												
15																												
16																												
17																												
18																												
19																												
20																												
21																												
22																												
23																												
24																												
25																												
26																												

MIN

0.996 (16, 8)

MAX

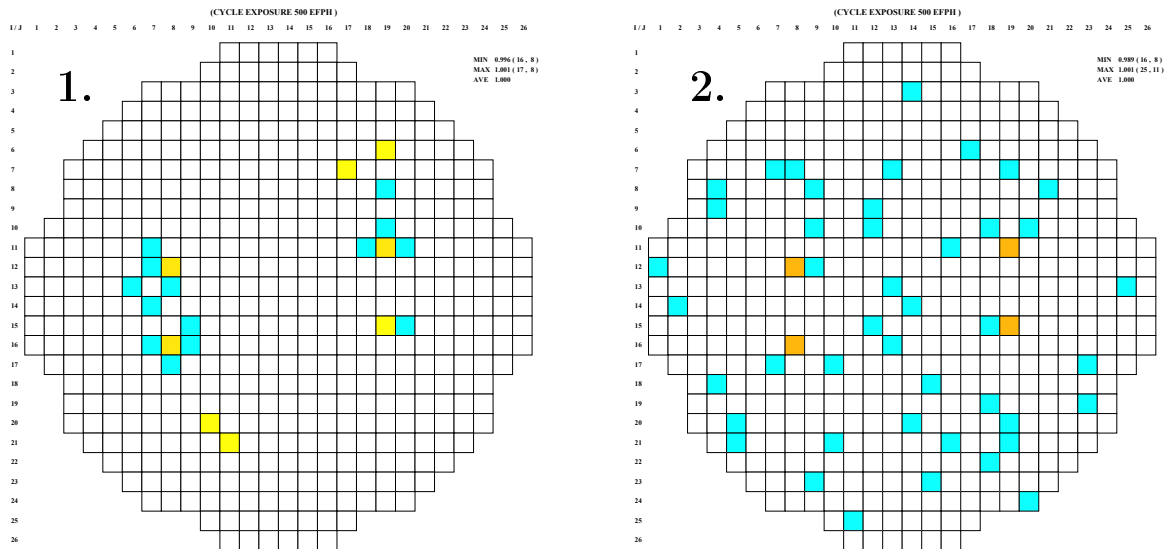
1.001 (17, 8)

AVE

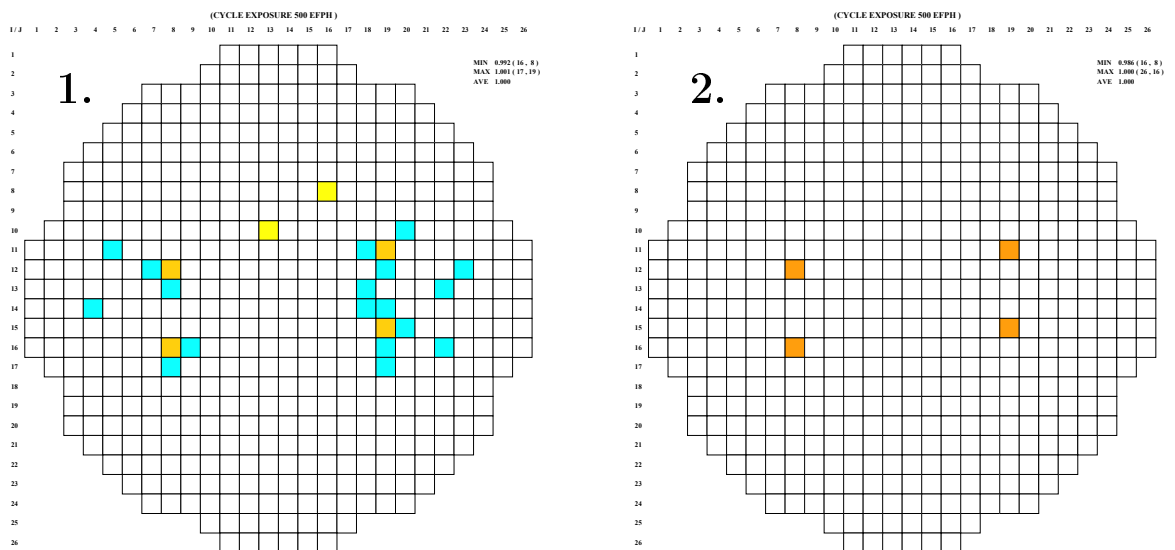
1.000

MIN 0.996 (16, 8)
MAX 1.001 (17, 8)
AVE 1.000

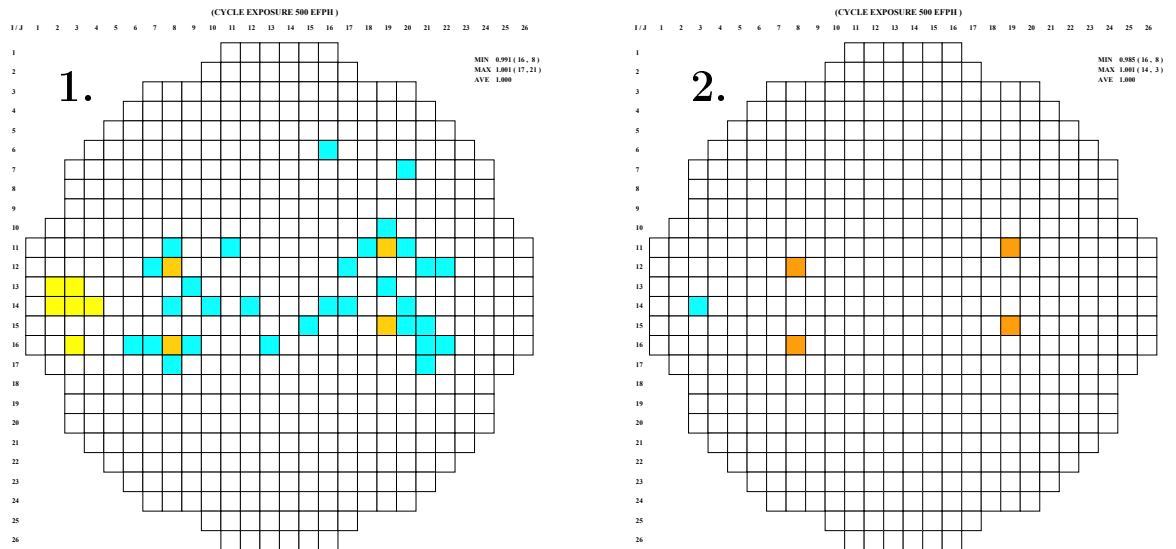
Kuva 35. Nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään, kun ryhmällä 1 (ks. kuva 21) karheus on 1 μm (2500 MW, 7650 kg/s). Kuvassa yksi neliö kuvaa yhtä polttoaine-elementtiä. Neliöissä ylin arvo on kyseisen polttoaine-elementin CPR-arvo, kun kaikki polttoaine-elementit on oletettu sileiksi. Keskimäinen arvo vastaa CPR-arvoa, kun ryhmällä 1 on 1 μm karheus ja muut ovat sileitä. Alin arvo kuvaa näiden suhdetta (karhea tapaus/sileä tapaus). CPR-arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvaa sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.



Kuva 36. Kuvat vasemmalta oikealle: nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään kohdassa 500 EFPH, nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen kohdassa 500 EFPH, kun ryhmän 1 (ks. kuva 21) polttoaine-elementeillä karheus on $1\ \mu\text{m}$ (2500 MW, 7650 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvua sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.

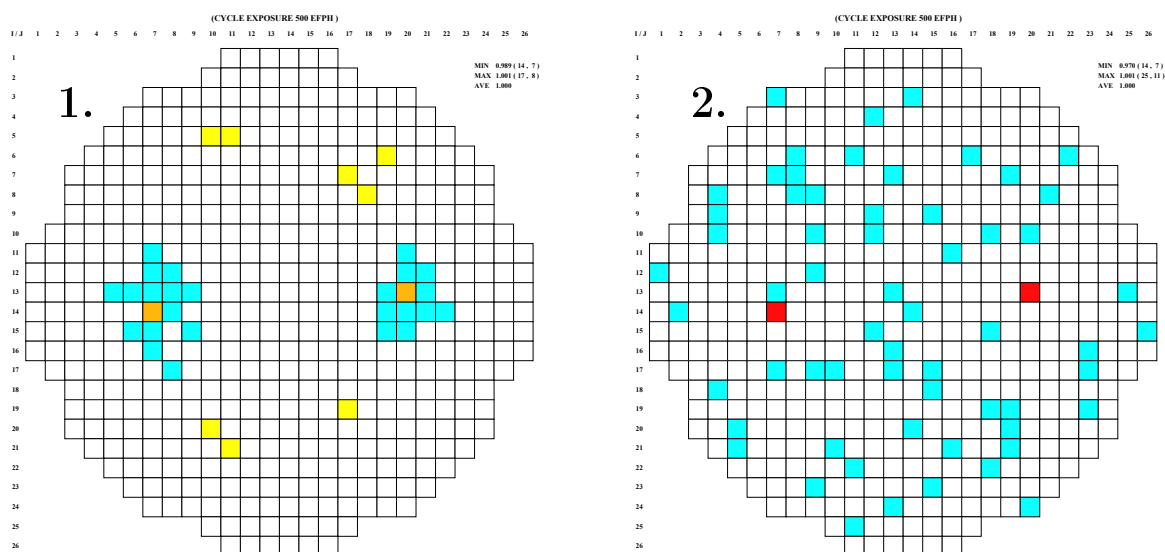


Kuva 37. Kuvat vasemmalta oikealle: nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään kohdassa 500 EFPH, nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen kohdassa 500 EFPH, kun ryhmän 1 (ks. kuva 21) polttoaine-elementtien karheus on $1\ \mu\text{m}$ (1900 MW, 4600 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvua sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.

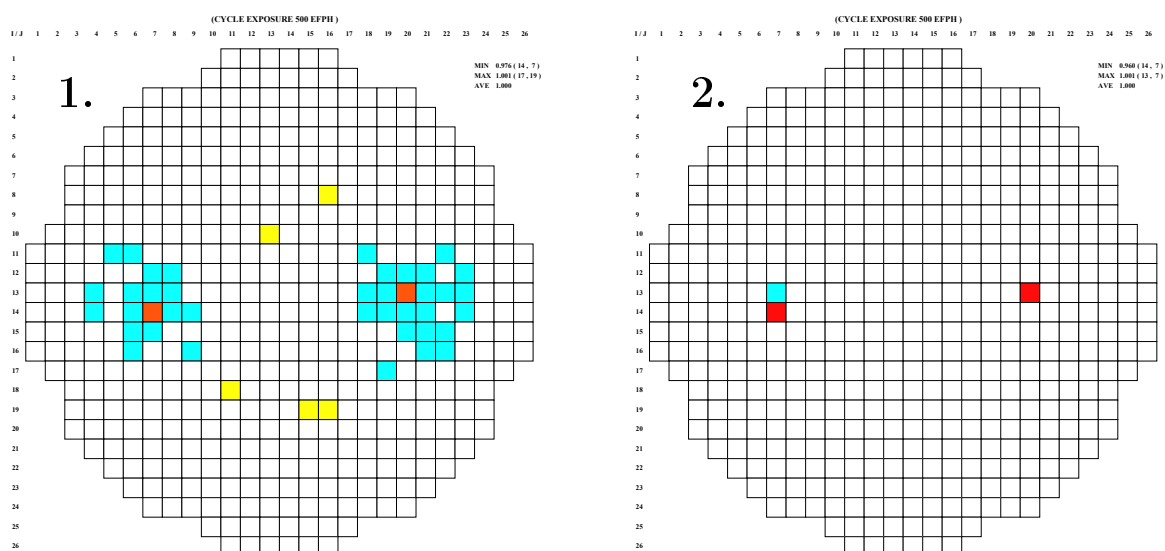


Kuva 38. Kuvat vasemmalta oikealle: nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään kohdassa 500 EFPH, nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen kohdassa 500 EFPH, kun ryhmän 1 (ks. kuva 21) polttoaine-elementtien karheus on $1\ \mu\text{m}$ (1750 MW, 4000 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvua sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.

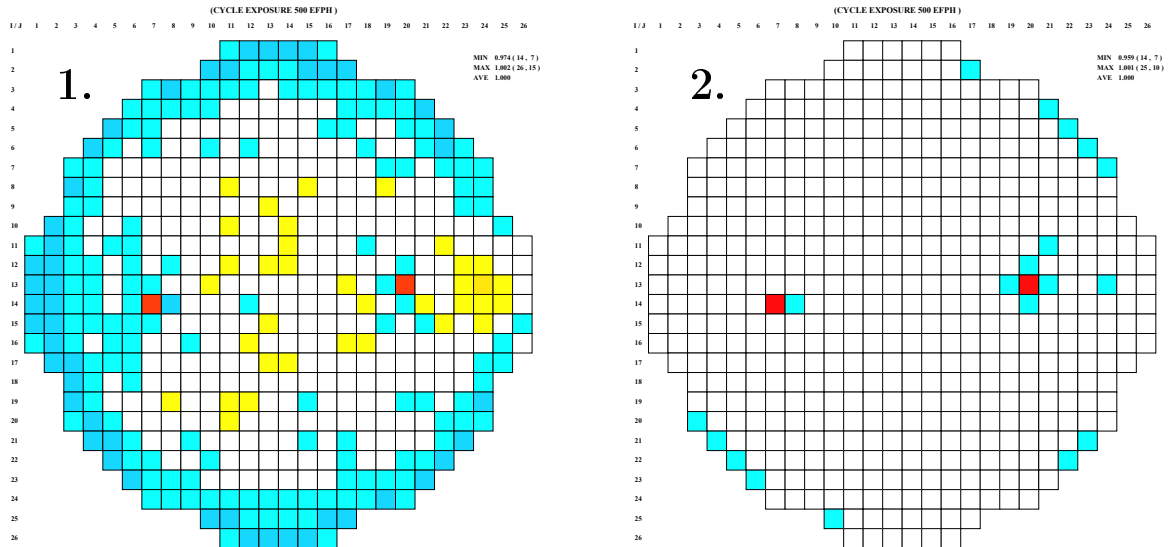
Ryhmän 2 (ks. kuva 21) polttoaine-elementteillä 3 μm karheus



Kuva 39. Kuvat vasemmalta oikealle: nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään kohdassa 500 EFPH, nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen kohdassa 500 EFPH, kun ryhmän 2 (ks. kuva 21) polttoaine-elementtien karheus on 3 μm (2500 MW, 7650 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvua sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.

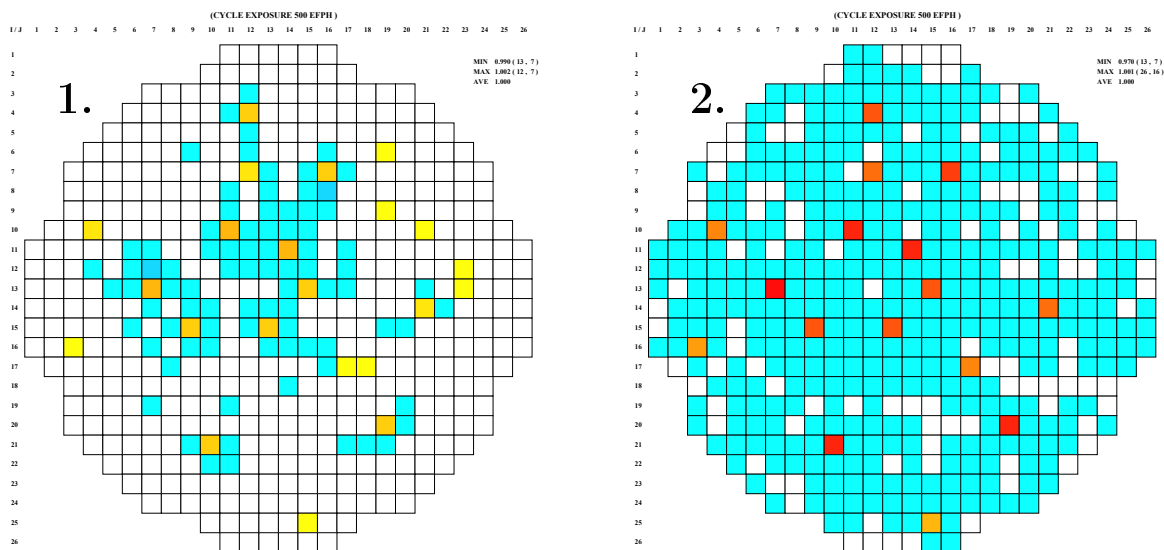


Kuva 40. Kuvat vasemmalta oikealle: nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään kohdassa 500 EFPH, nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen kohdassa 500 EFPH, kun ryhmän 2 (ks. kuva 21) polttoaine-elementtien karheus on 3 μm (1900 MW, 4600 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvua sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.

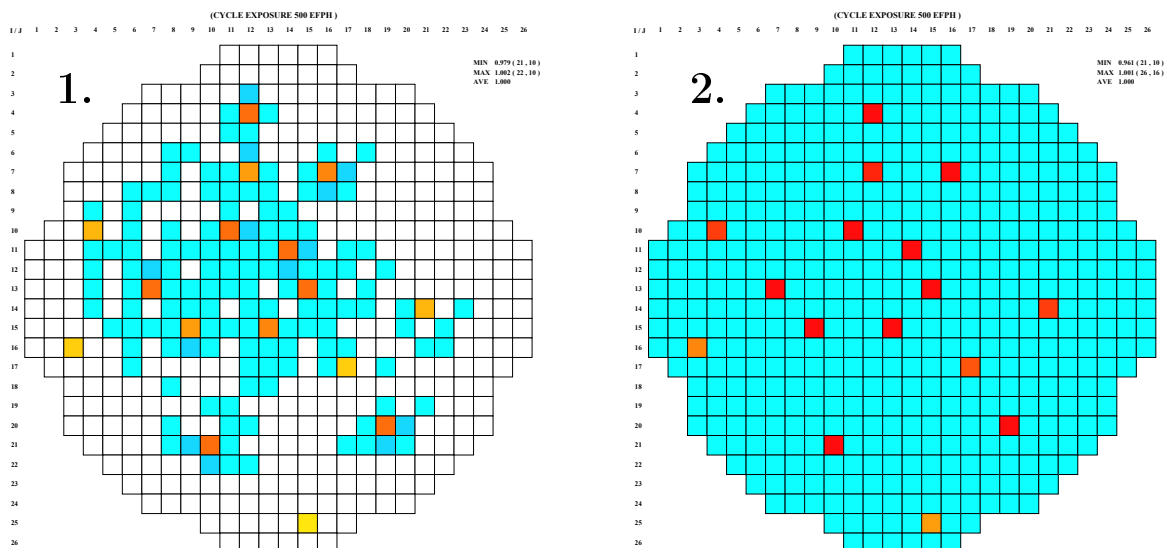


Kuva 41. Kuvat vasemmalta oikealle: nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään kohdassa 500 EFPH, nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen kohdassa 500 EFPH, kun ryhmän 2 (ks. kuva 21) polttoaine-elementtien karheus on $3\ \mu\text{m}$ (1750 MW, 4000 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvua sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.

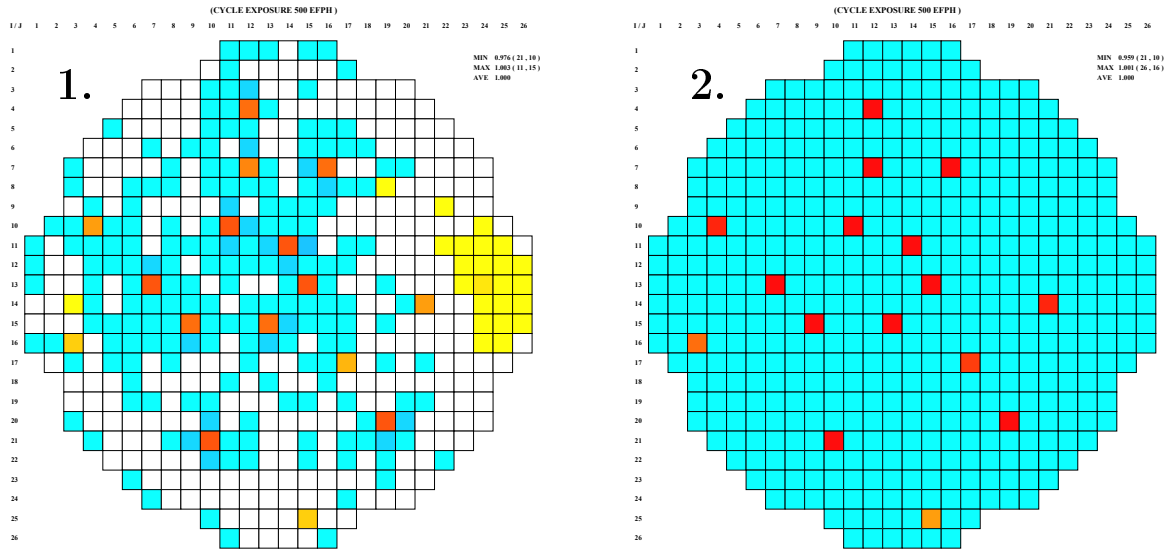
Satunnaisesti valituilla polttoaine-elementeillä 3 μm karheus (kuvan 21 ryhmä 3)



Kuva 42. Kuvat vasemmalta oikealle: nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään kohdassa 500 EFPH, nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen kohdassa 500 EFPH, kun satunnaisten polttoaine-elementtien (kuvan 21 ryhmä 3) karheus on 3 μm (2500 MW, 7650 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvua sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.

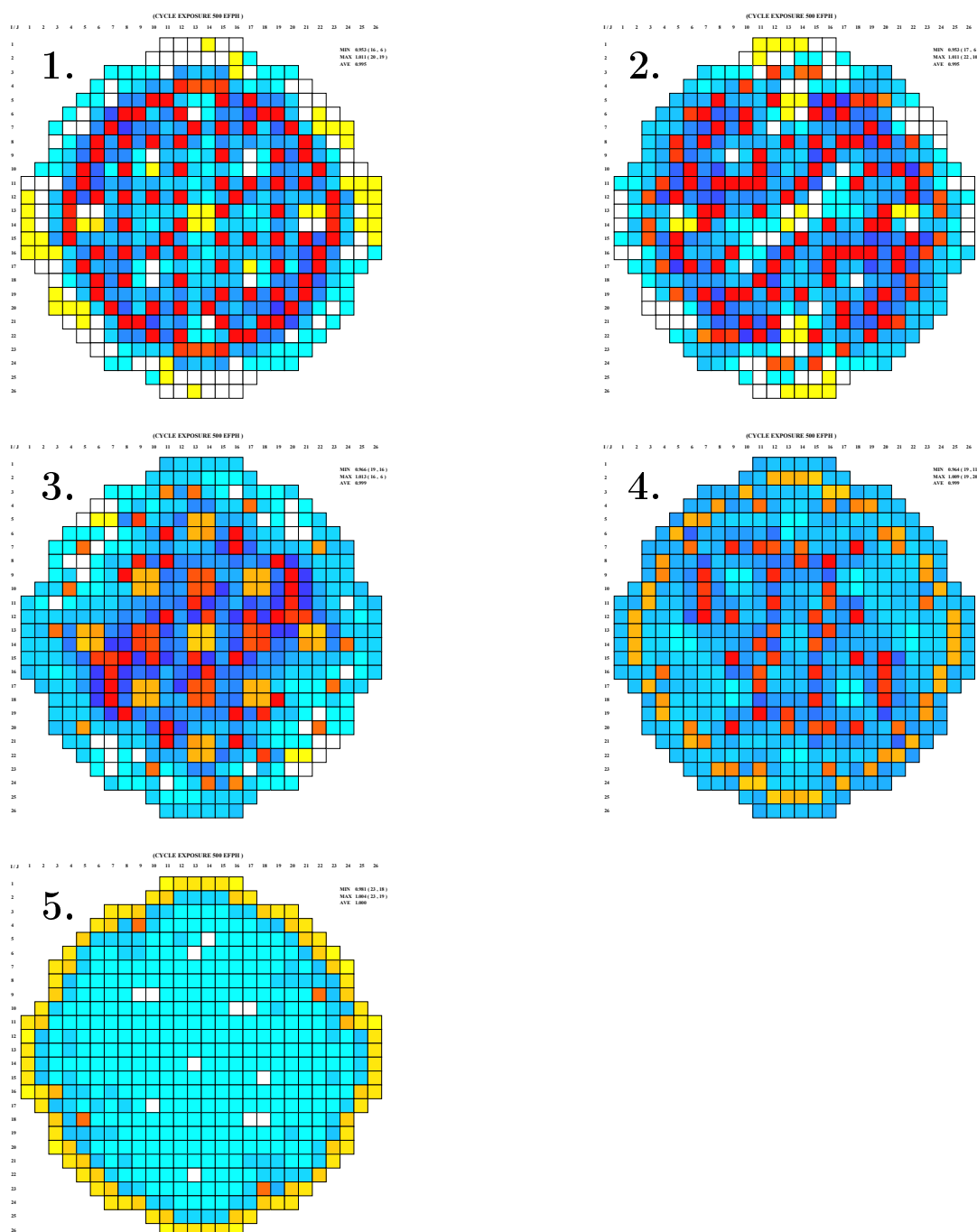


Kuva 43. Kuvat vasemmalta oikealle: nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään kohdassa 500 EFPH, nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen kohdassa 500 EFPH, kun satunnaisten polttoaine-elementtien (kuvan 21 ryhmä 3) karheus on 3 μm (1900 MW, 4600 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvua sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.

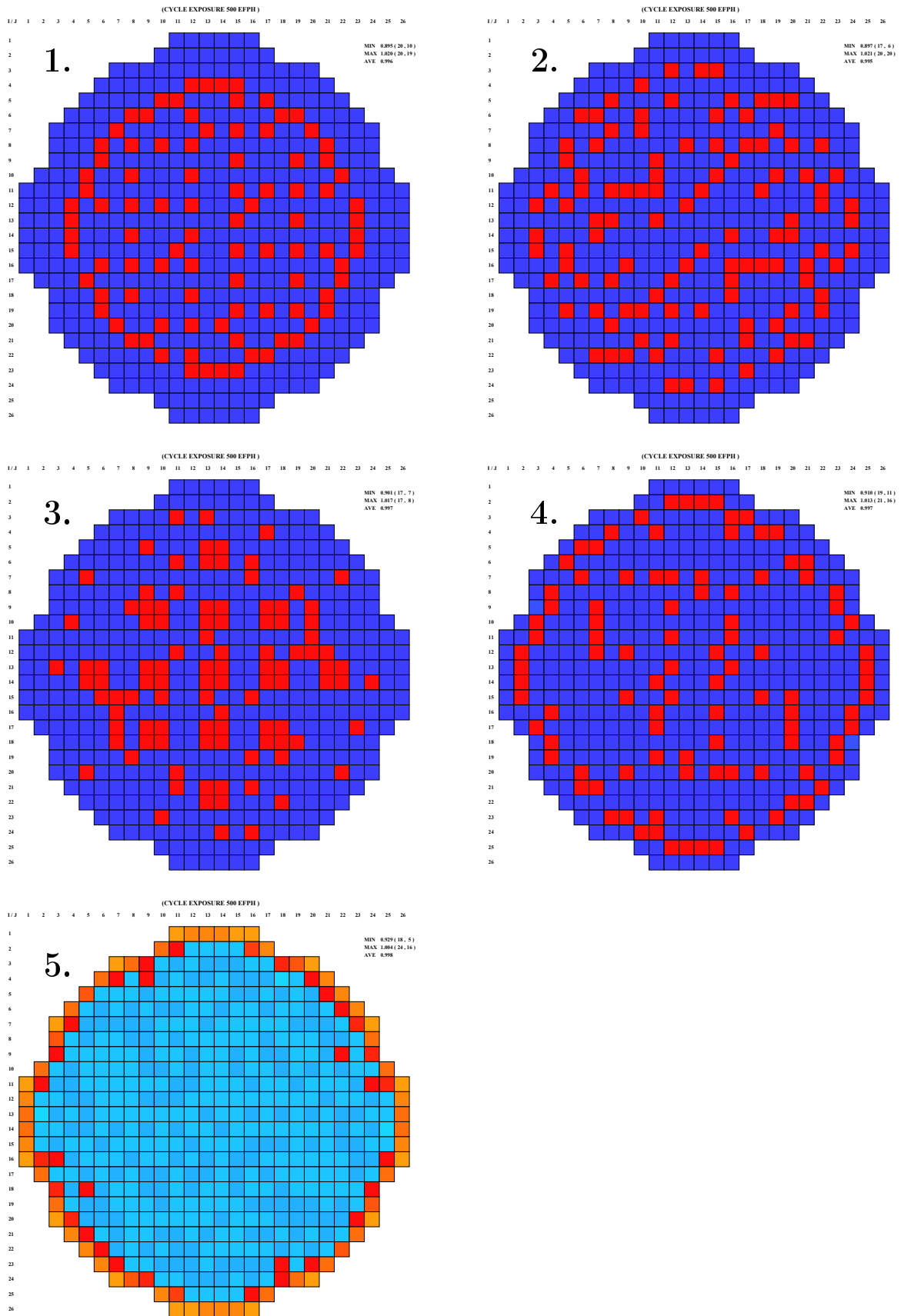


Kuva 44. Kuvat vasemmalta oikealle: nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään kohdassa 500 EFPH, nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen kohdassa 500 EFPH, kun satunnaisten polttoaine-elementtien (kuvan 21 ryhmä 3) karheus on $3\ \mu\text{m}$ (1750 MW, 4000 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvua sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.

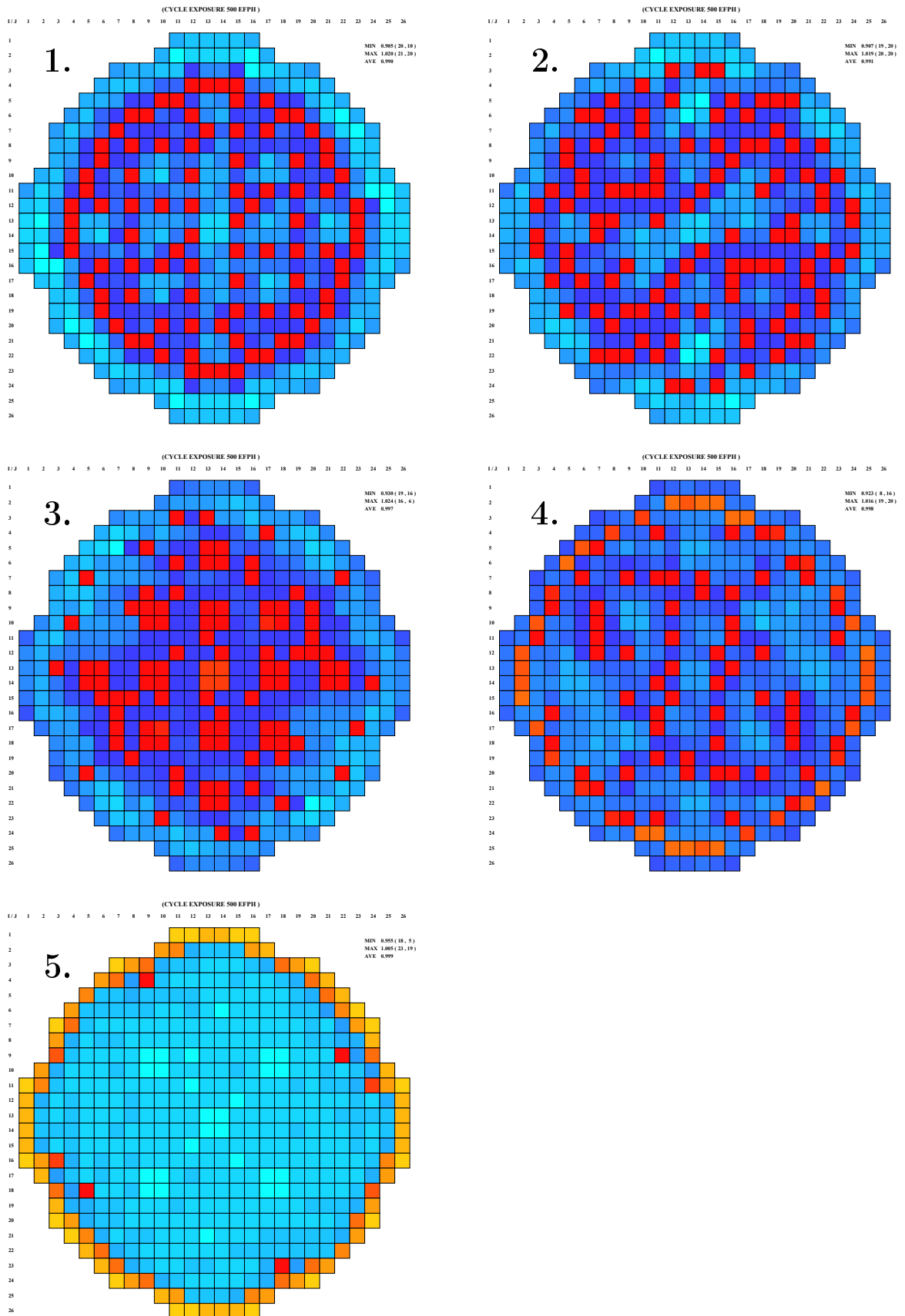
LIITE D: OL2C37 - CPR:N JA AKTIIVIVIRTAUKSEN MUUTOKSET, KUN YHDELLÄ IKÄLUOKALLA ON KARHEUTTA 20 μM JA MUUT OVAT SILEITÄ



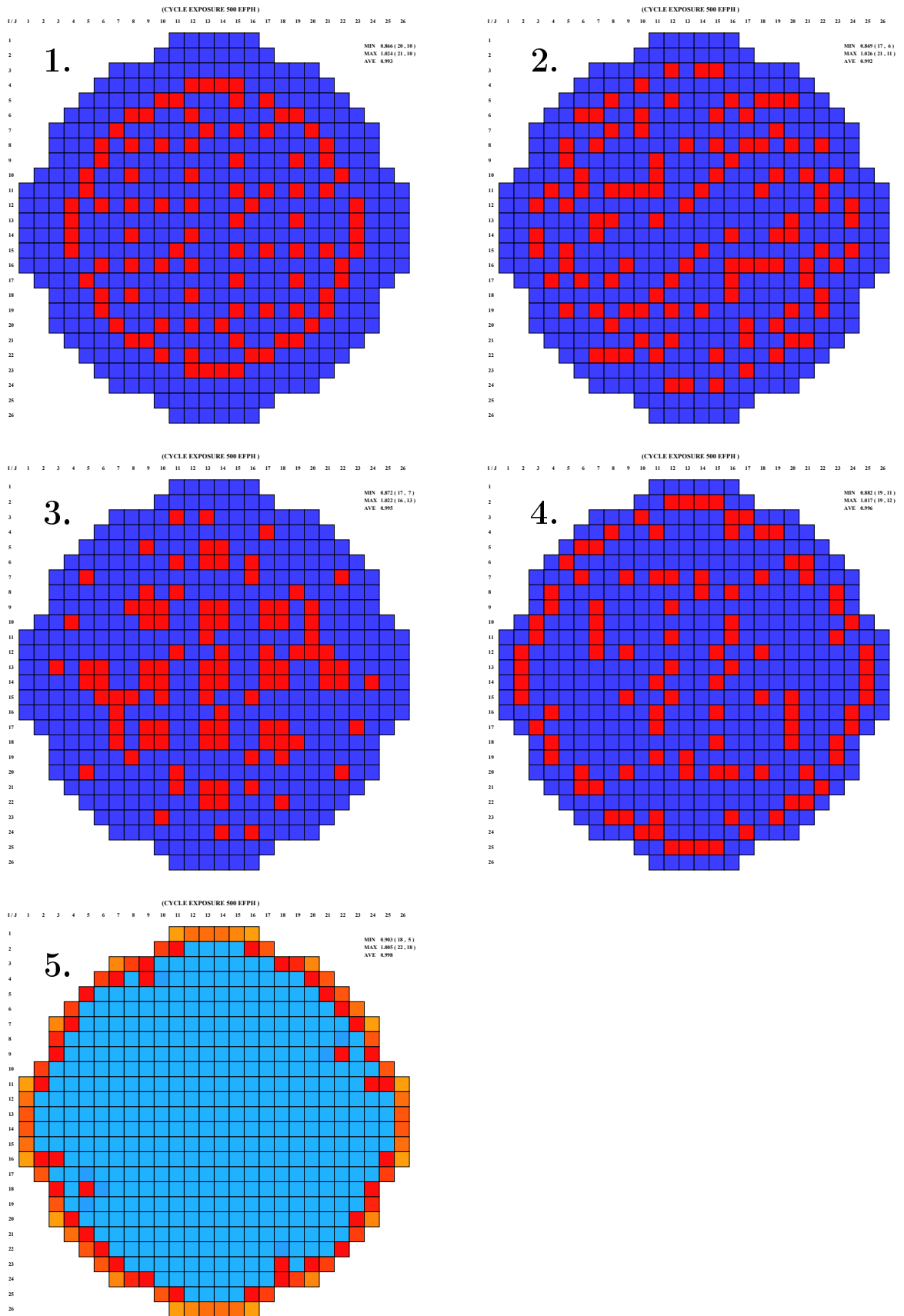
Kuva 45. Nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään jakson kohdassa 500 EFPH, kun yhdellä ikäluokalla karheutta ja muut sileitä. Kuvat vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas: 0–1 vuotiailla karheutta 20 μm , 1–2 vuotiailla 20 μm , 2–3 vuotiailla 20 μm , 3–4 vuotiailla 20 μm ja 4–6 vuotiailla 20 μm (2500 MW, 7650 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvua sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.



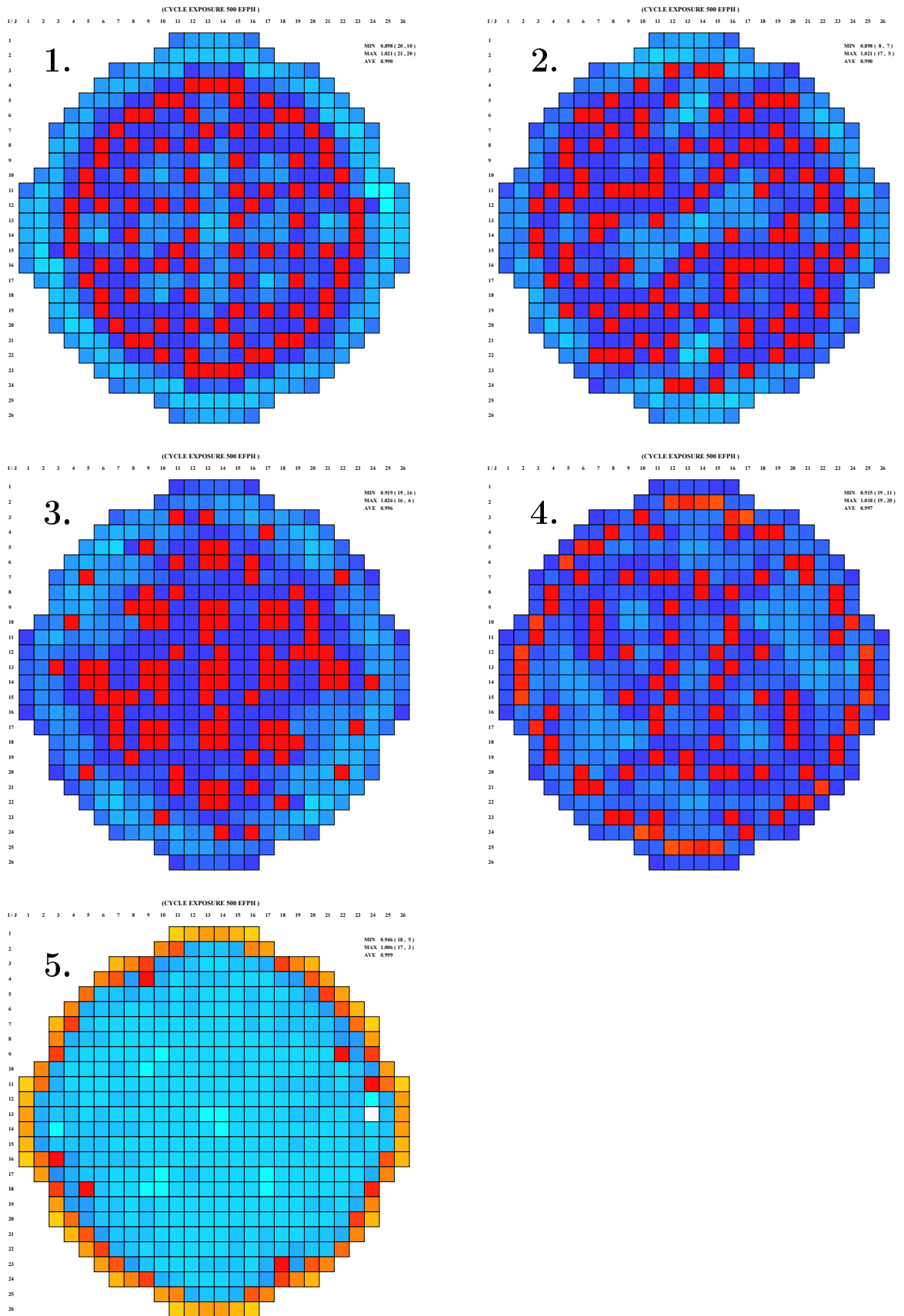
Kuva 46. Nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen jakson kohdassa 500 EFPH, kun yhdellä ikäluokalla karheutta ja muut sileitä. Kuvat vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas: 0–1 vuotiailla on karheutta 20 μm , 1–2 vuotiailla 20 μm , 2–3 vuotiailla 20 μm , 3–4 vuotiailla 20 μm ja 4–6 vuotiailla 20 μm (2500 MW, 7650 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvaa sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.



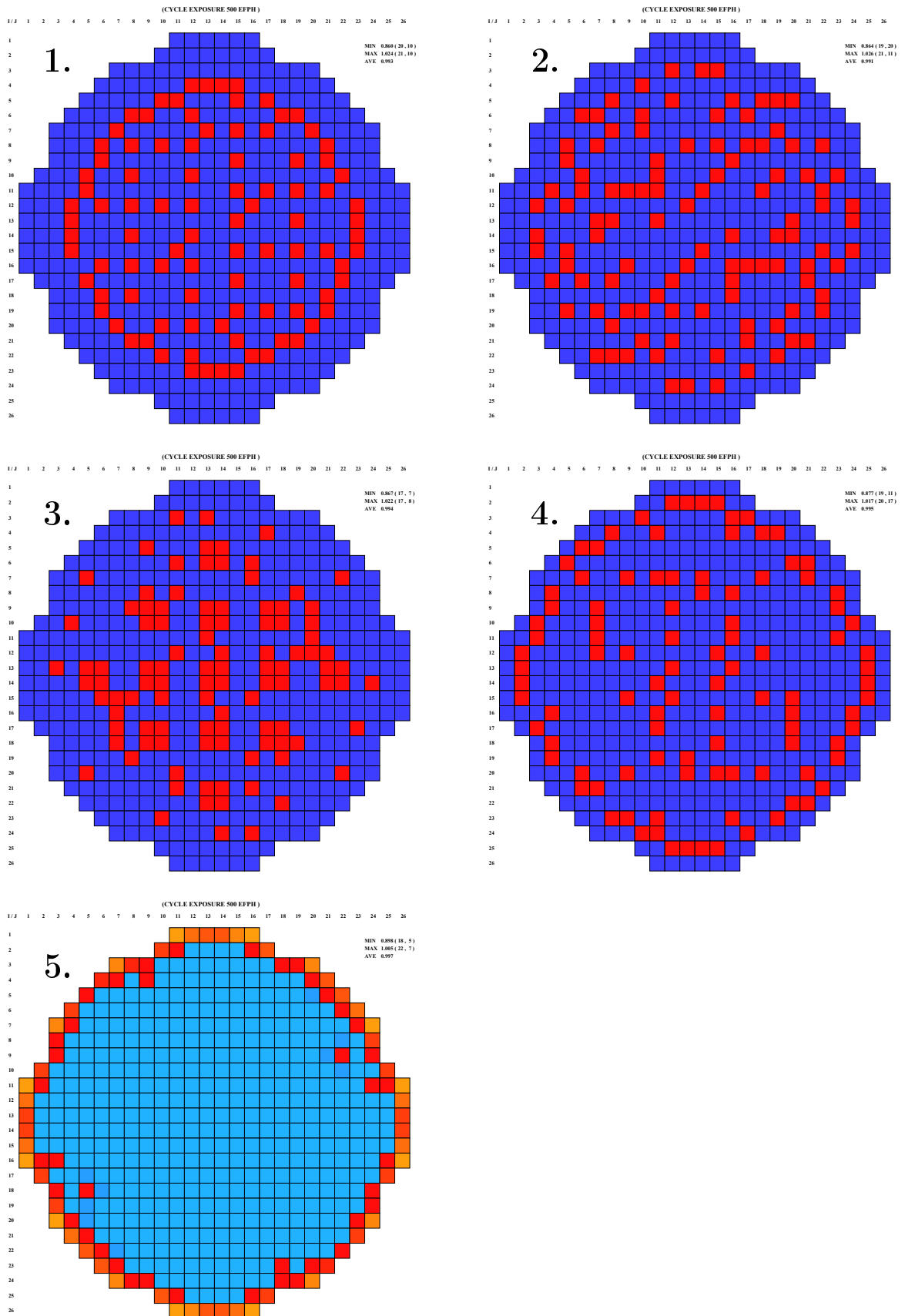
Kuva 47. Nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään jakson kohdassa 500 EFPH, kun yhdellä ikäluokalla karheutta ja muut sileitä. Kuvat vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas: 0–1 vuotiailla on karheutta 20 μm , 1–2 vuotiailla 20 μm , 2–3 vuotiailla 20 μm , 3–4 vuotiailla 20 μm ja 4–6 vuotiailla 20 μm (1900 MW, 4600 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvua sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.



Kuva 48. Nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen jakson kohdassa 500 EFPH, kun yhdellä ikäluokalla karheutta ja muut sileitä. Kuvat vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas: 0–1 vuotiailla on karheutta 20 μm , 1–2 vuotiailla 20 μm , 2–3 vuotiailla 20 μm , 3–4 vuotiailla 20 μm ja 4–6 vuotiailla 20 μm (1900 MW, 4600 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvua sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.

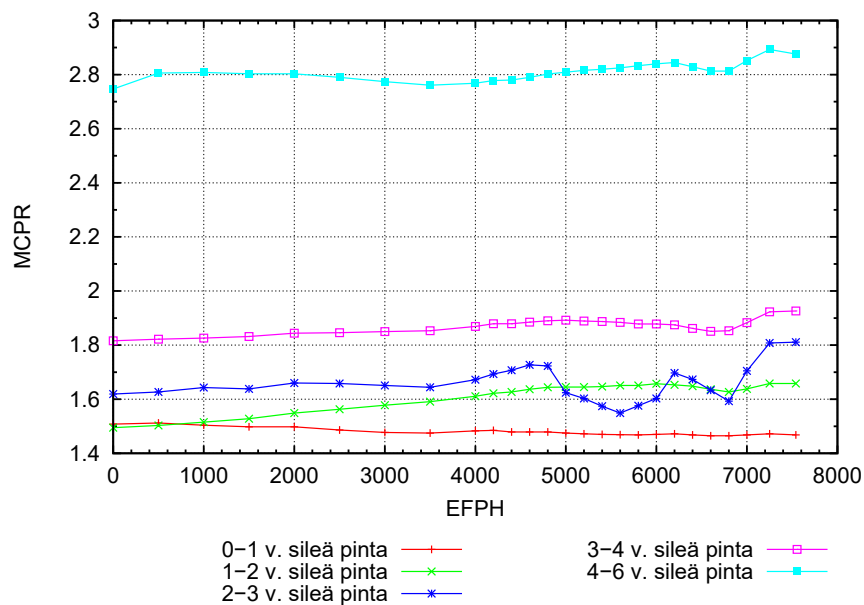


Kuva 49. Nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään jakson kohdassa 500 EFPH, kun yhdellä ikäluokalla karheutta ja muut sileitä. Kuvat vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas: 0–1 vuotiailla on karheutta 20 μm , 1–2 vuotiailla 20 μm , 2–3 vuotiailla 20 μm , 3–4 vuotiailla 20 μm ja 4–6 vuotiailla 20 μm (1750 MW, 4000 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvua sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.

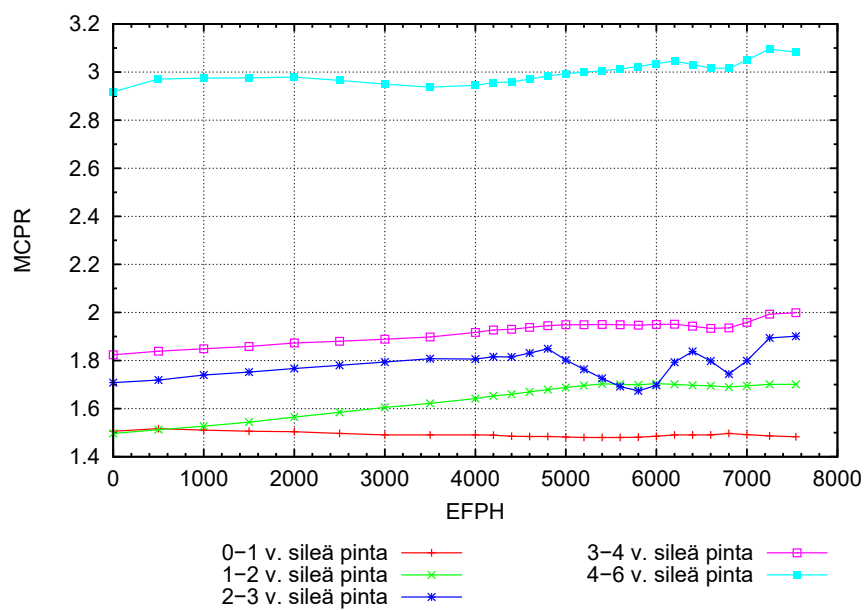


Kuva 50. Nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen jakson kohdassa 500 EFPH, kun yhdellä ikäluokalla karheutta ja muut sileitä. Kuvat vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas: 0–1 vuotiailla on karheutta 20 μm , 1–2 vuotiailla 20 μm , 2–3 vuotiailla 20 μm , 3–4 vuotiailla 20 μm ja 4–6 vuotiailla 20 μm (1750 MW, 4000 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvua sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.

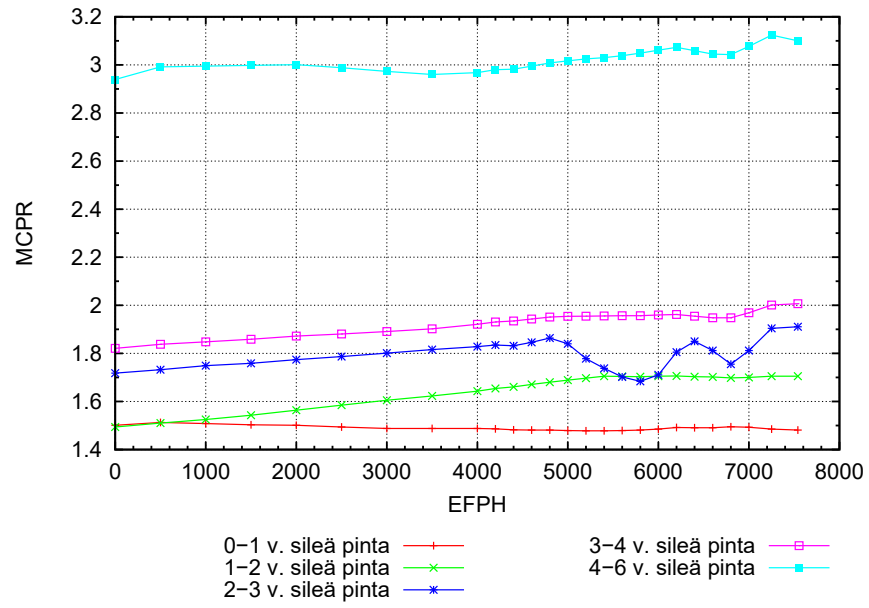
LIITE E: OL2C37 - KARHEUDEN VAIKUTUS KOKO REAKTORIN MCPR-ARVOON



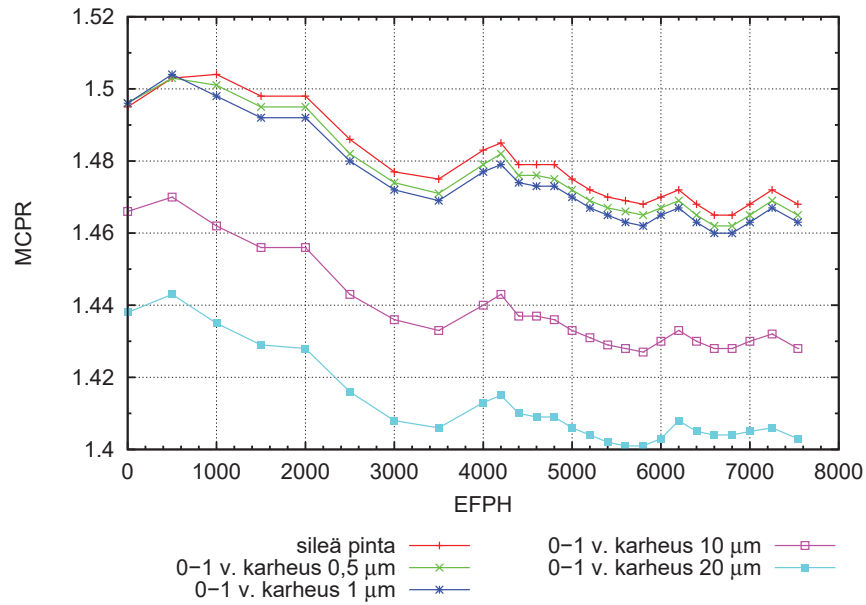
Kuva 51. Eri ikäluokkien MCPR, kun pinta on sileä (2500 MW, 7650 kg/s).



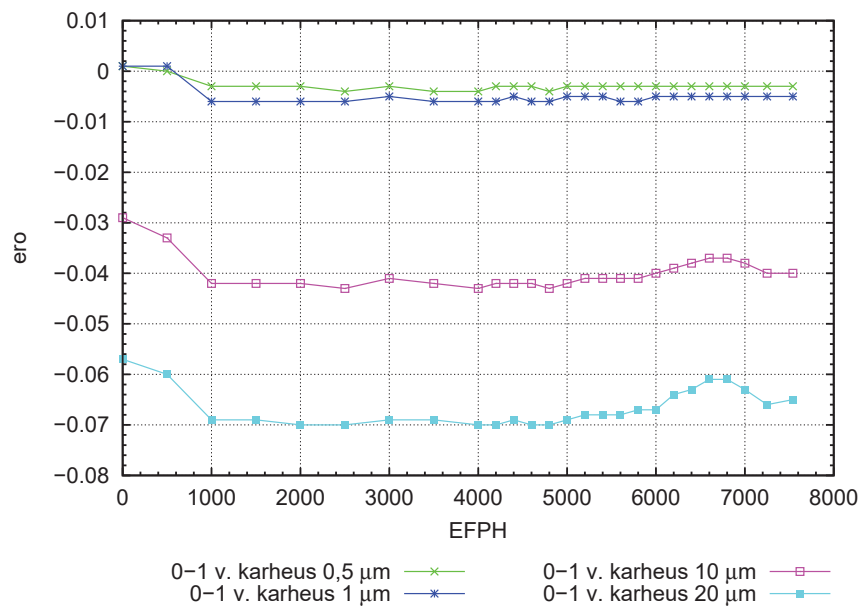
Kuva 52. Eri ikäluokkien MCPR, kun pinta on sileä (1900 MW, 4600 kg/s).



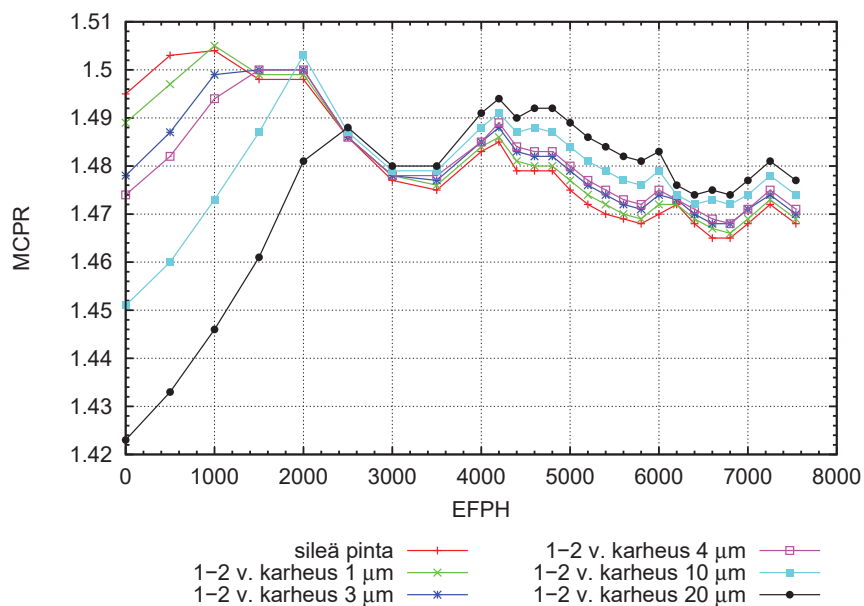
Kuva 53. Eri ikäluokkien MCPR, kun pinta on sileä (1750 MW, 4000 kg/s).



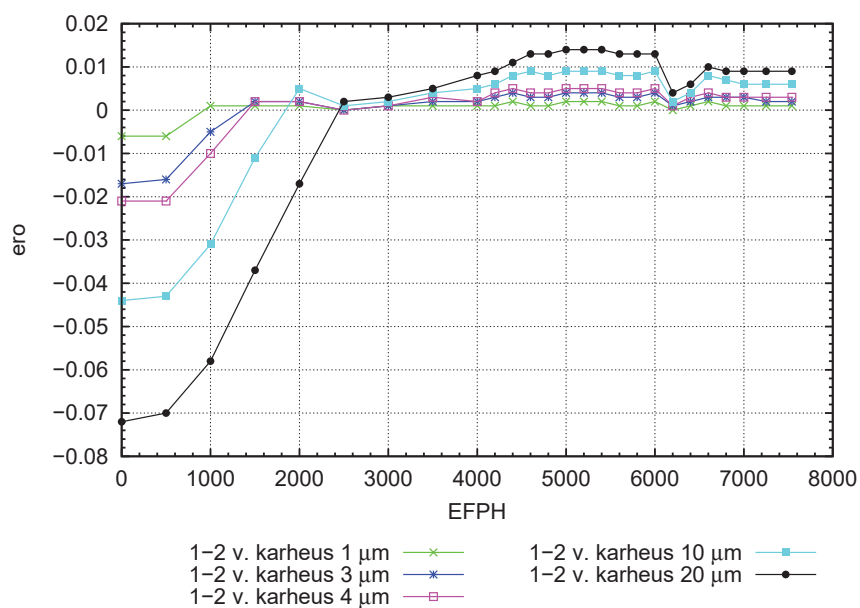
Kuva 54. Koko reaktorin MCPR, kun 0-1 vuotiailla on eri karheusarvoja (2500 MW, 7650 kg/s).



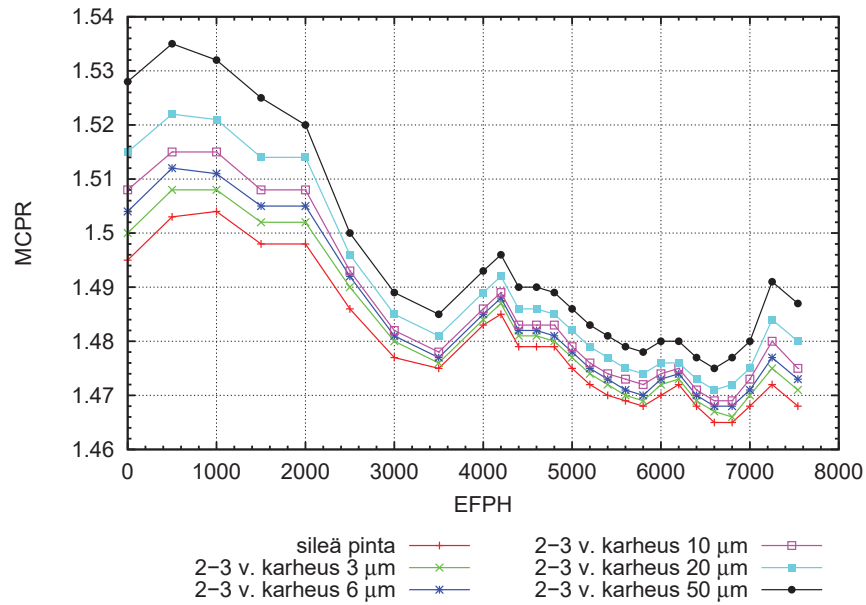
Kuva 55. Koko reaktorin MCPR-arvon ero sileän pinnan MCPR-arvoon (karhea tapaus - sileä tapaus), kun 0-1 vuotiailla on eri karheusarvoja (2500 MW, 7650 kg/s).



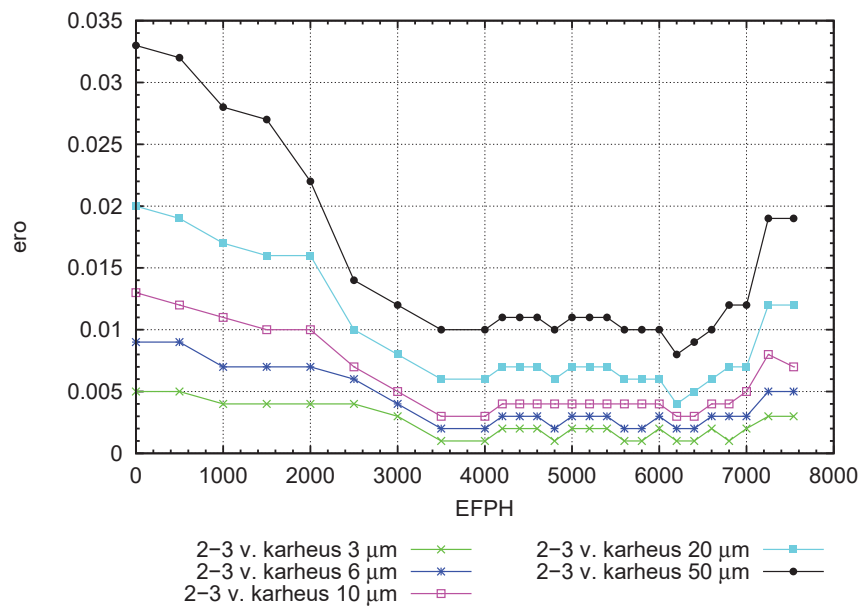
Kuva 56. Koko reaktorin MCPR, kun 1-2 vuotiailla on eri karheusarvoja (2500 MW, 7650 kg/s).



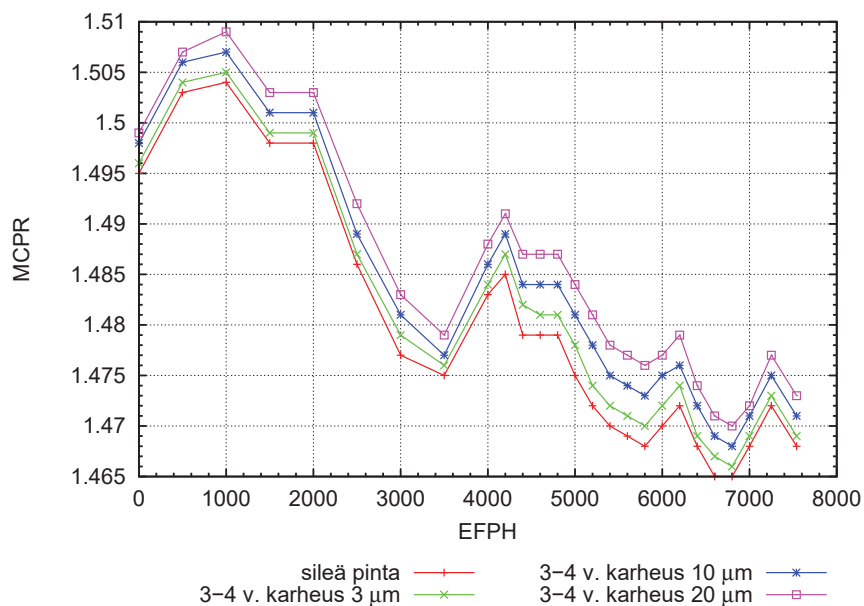
Kuva 57. Koko reaktorin MCPR-arvon ero sileän pinnan MCPR-arvoon (karhea tapaus - sileä tapaus), kun 1-2 vuotiailla on eri karheusarvoja (2500 MW, 7650 kg/s).



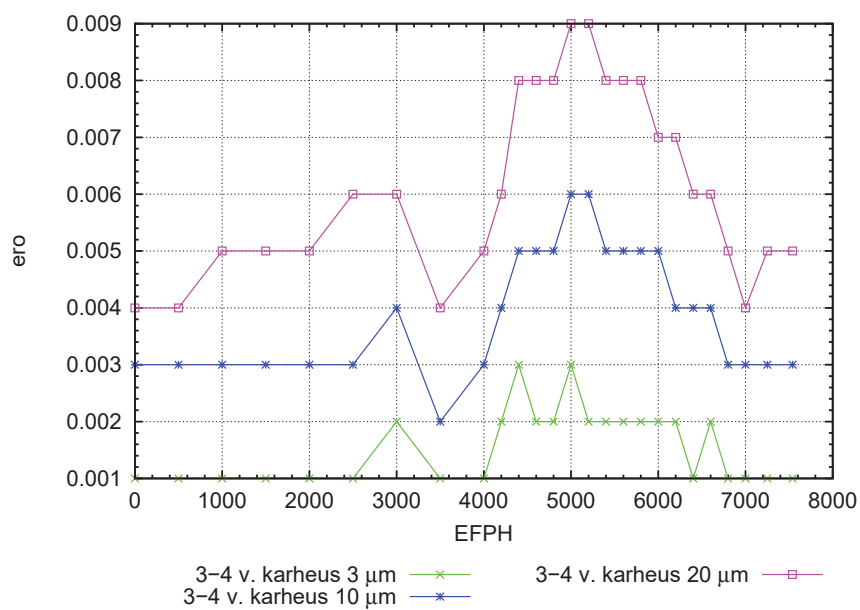
Kuva 58. Koko reaktorin MCPR, kun 2-3 vuotiailla on eri karheusarvoja (2500 MW, 7650 kg/s).



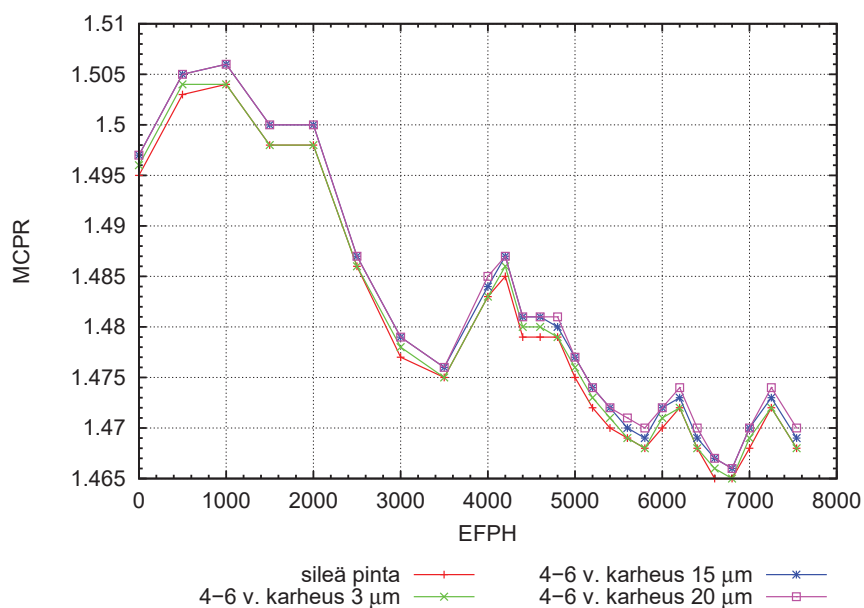
Kuva 59. Koko reaktorin MCPR-arvon ero sileän pinnan MCPR-arvoon (karhea tapaus - sileä tapaus), kun 2-3 vuotiailla on eri karheusarvoja (2500 MW, 7650 kg/s).



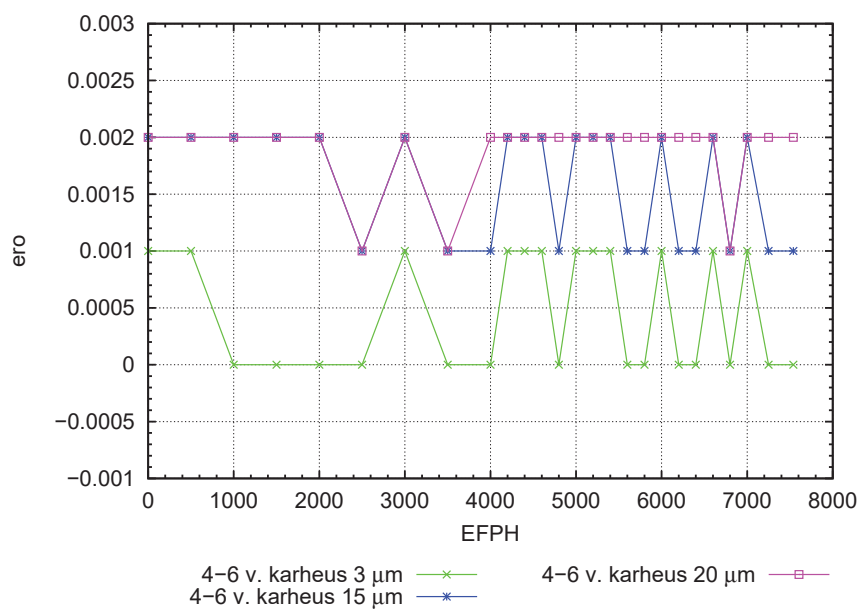
Kuva 60. Koko reaktorin MCPR, kun 3-4 vuotiailla on eri karheusarvoja (2500 MW, 7650 kg/s).



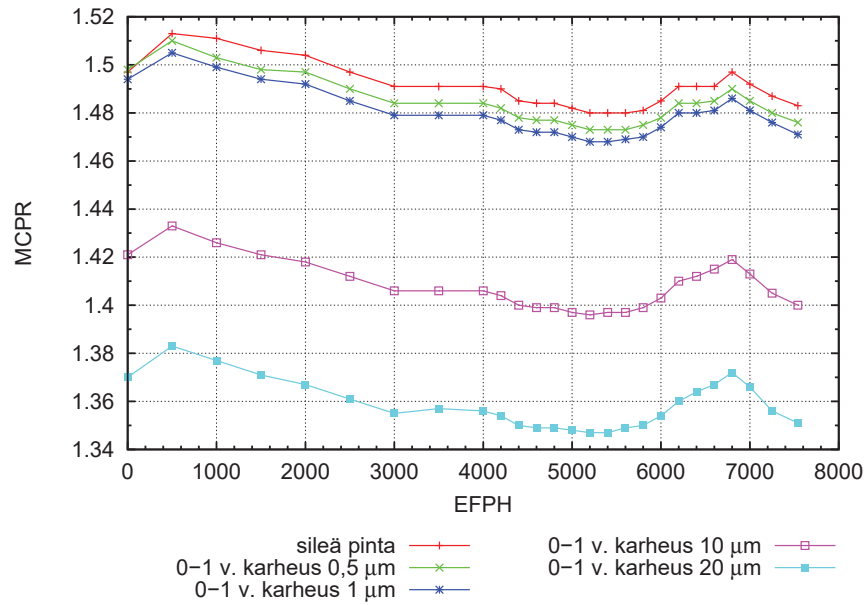
Kuva 61. Koko reaktorin MCPR-arvon ero sileän pinnan MCPR-arvoon (karhea tapaus - sileä tapaus), kun 3-4 vuotiailla on eri karheusarvoja (2500 MW, 7650 kg/s).



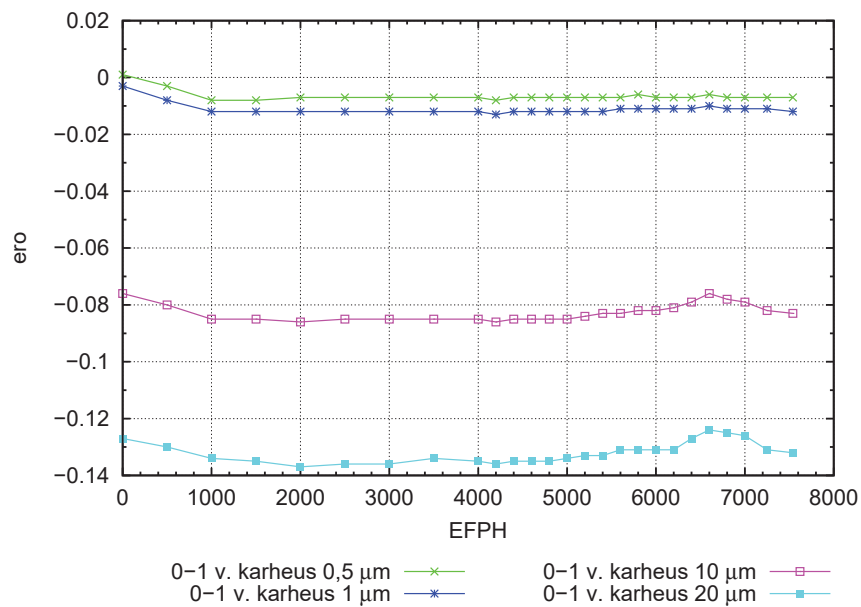
Kuva 62. Koko reaktorin MCPR, kun 4-6 vuotiailla on eri karheusarvoja (2500 MW, 7650 kg/s).



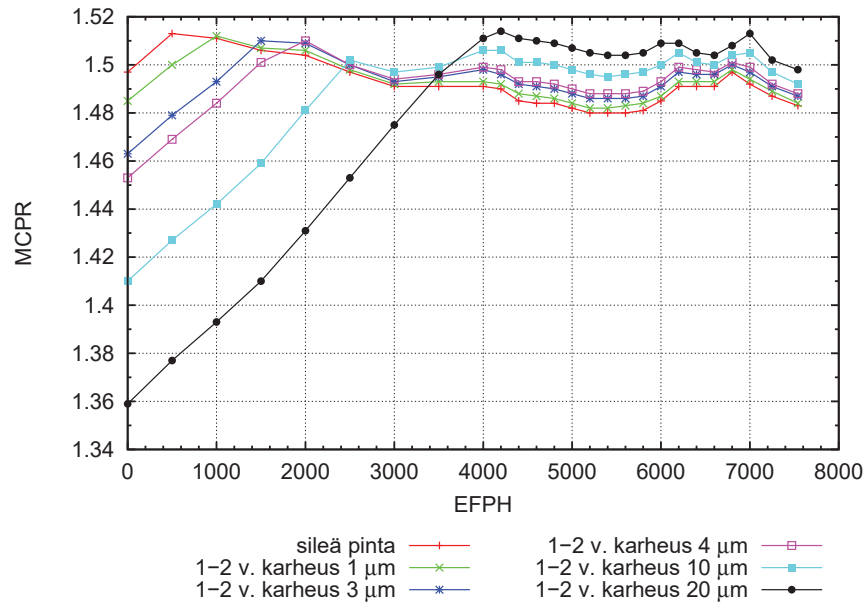
Kuva 63. Koko reaktorin MCPR-arvon ero sileän pinnan MCPR-arvoon (karhea tapaus - sileä tapaus), kun 4-6 vuotiailla on eri karheusarvoja (2500 MW, 7650 kg/s).



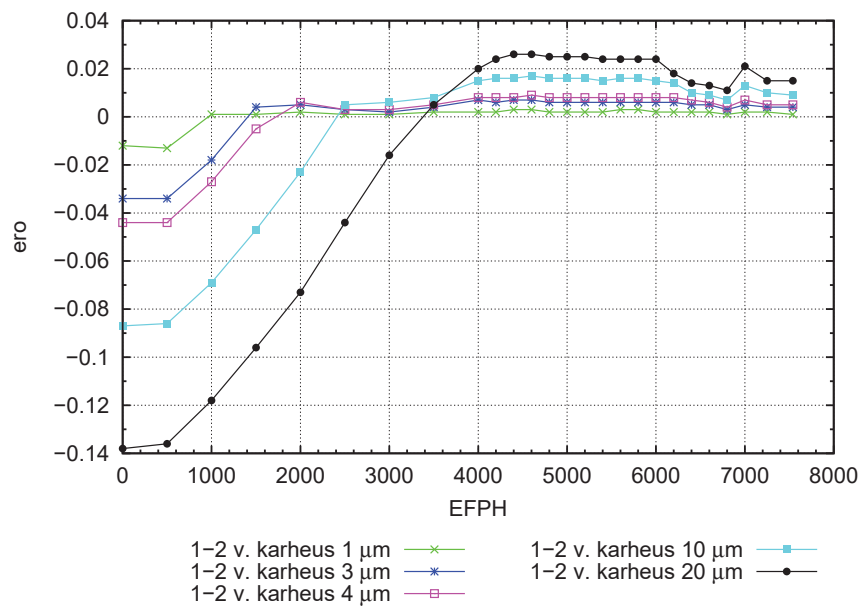
Kuva 64. Koko reaktorin MCPR, kun 0-1 vuotiailla on eri karheusarvoja (1900 MW, 4600 kg/s).



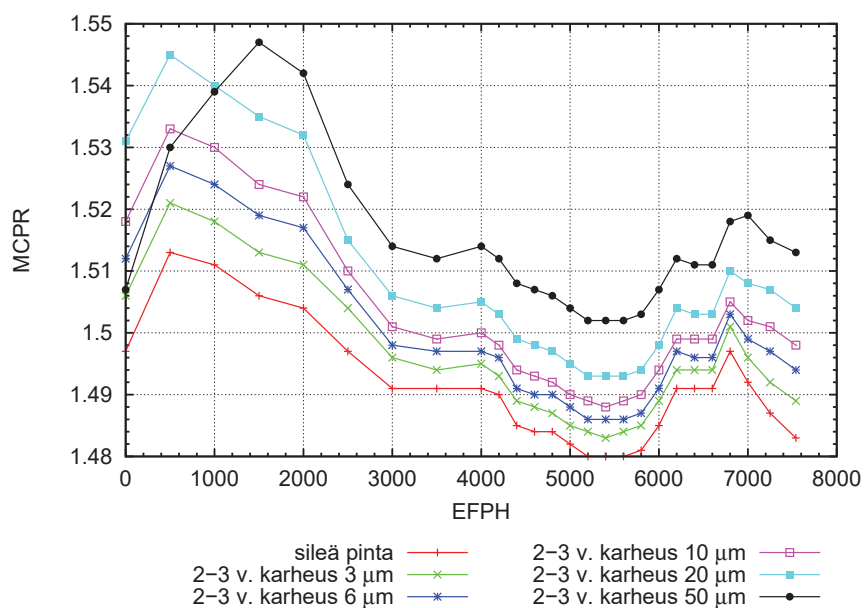
Kuva 65. Koko reaktorin MCPR-arvon ero sileän pinnan MCPR-arvoon (karhea tapaus - sileä tapaus), kun 0-1 vuotiailla on eri karheusarvoja (1900 MW, 4600 kg/s).



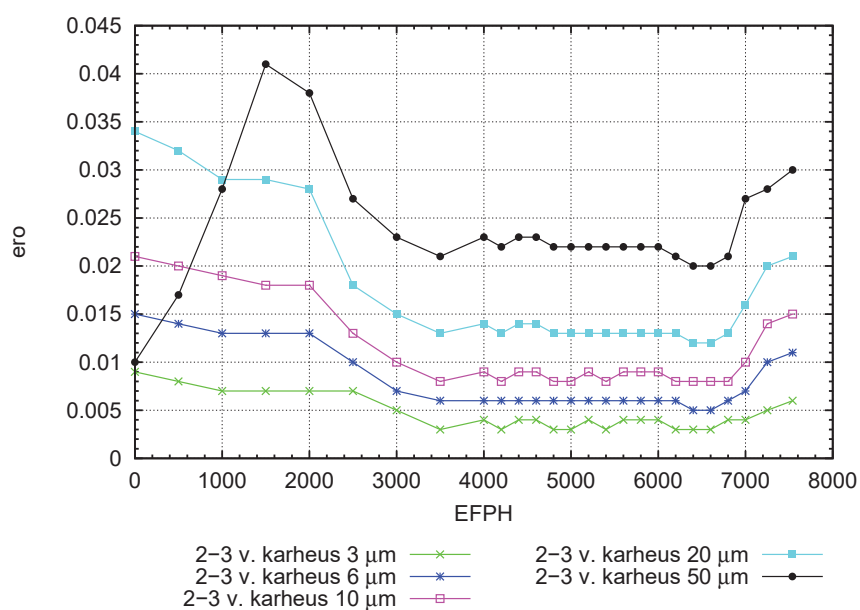
Kuva 66. Koko reaktorin MCPR, kun 1-2 vuotiailla on eri karheusarvoja (1900 MW, 4600 kg/s).



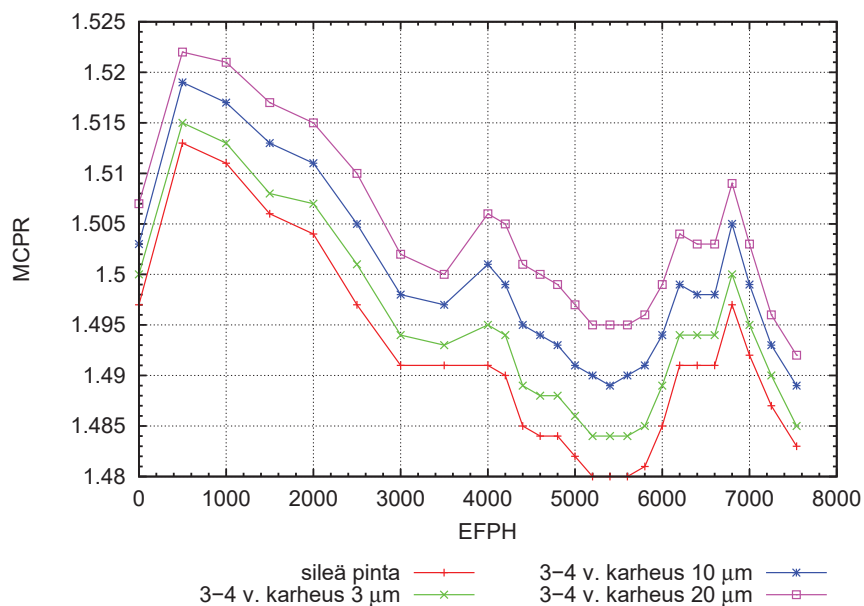
Kuva 67. Koko reaktorin MCPR-arvon ero sileän pinnan MCPR-arvoon (karhea tapaus - sileä tapaus), kun 1-2 vuotiailla on eri karheusarvoja (1900 MW, 4600 kg/s).



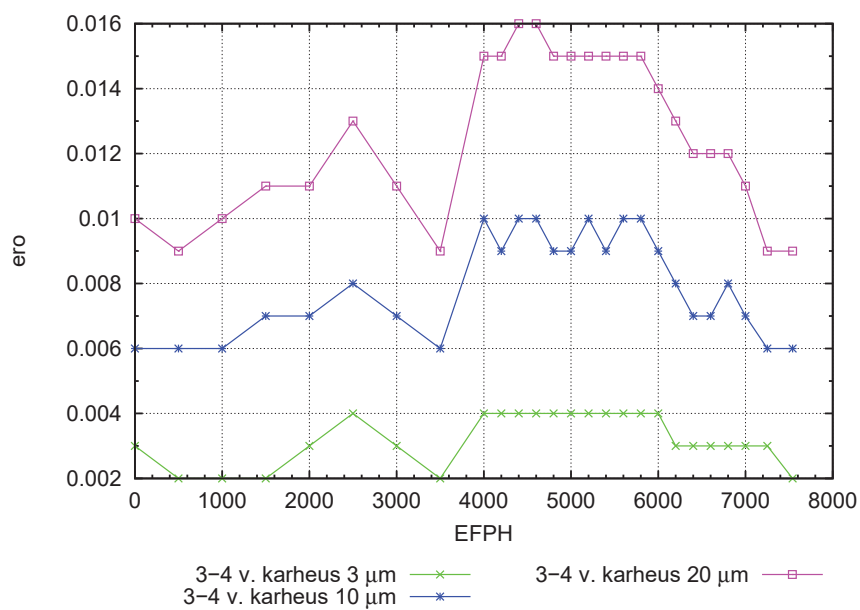
Kuva 68. Koko reaktorin MCPR, kun 2-3 vuotiailla on eri karheusarvoja (1900 MW, 4600 kg/s).



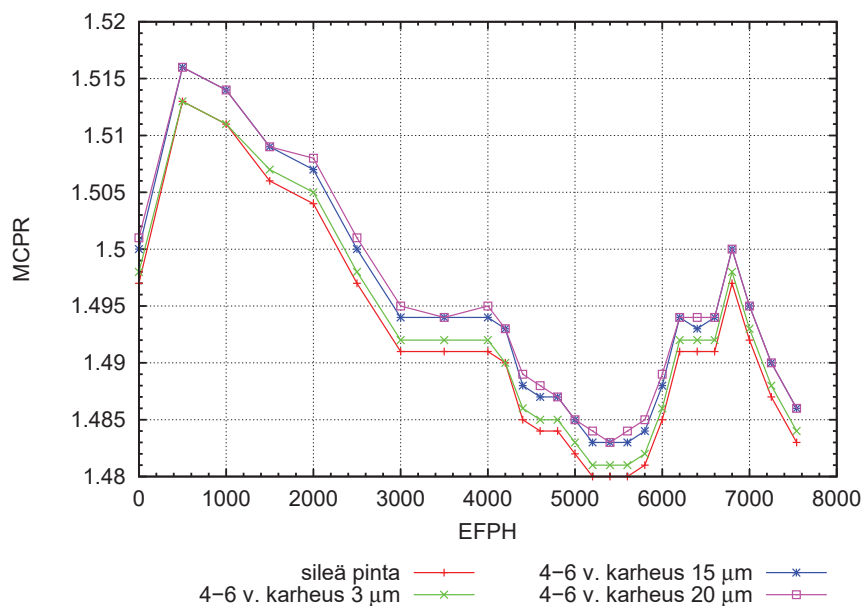
Kuva 69. Koko reaktorin MCPR-arvon ero sileän pinnan MCPR-arvoon (karhea tapaus - sileä tapaus), kun 2-3 vuotiailla on eri karheusarvoja (1900 MW, 4600 kg/s).



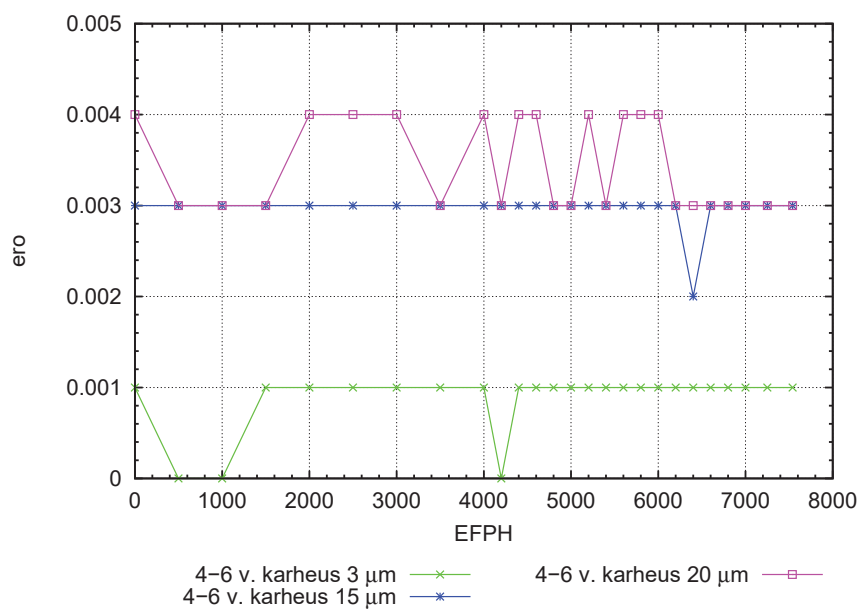
Kuva 70. Koko reaktorin MCPR, kun 3-4 vuotiailla on eri karheusarvoja (1900 MW, 4600 kg/s).



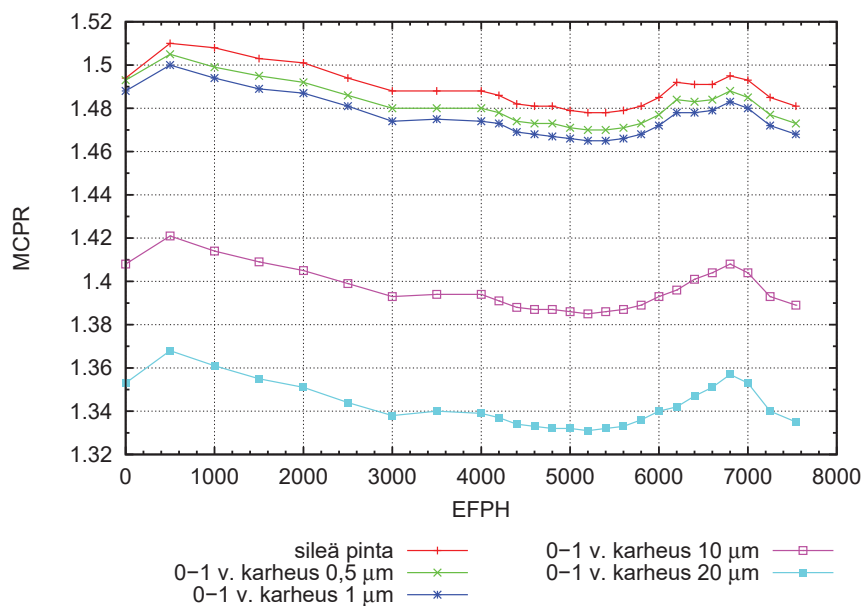
Kuva 71. Koko reaktorin MCPR-arvon ero sileän pinnan MCPR-arvoon (karhea tapaus - sileä tapaus), kun 3-4 vuotiailla on eri karheusarvoja (1900 MW, 4600 kg/s).



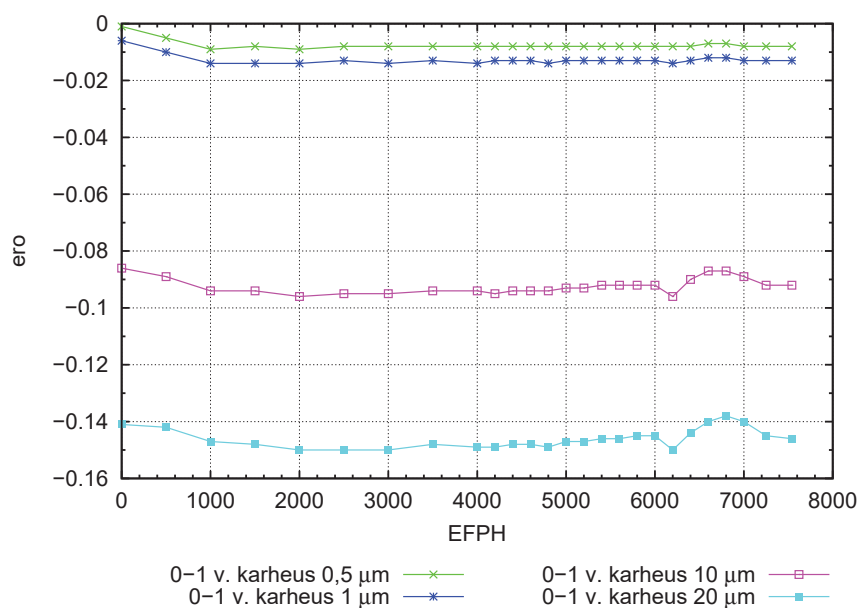
Kuva 72. Koko reaktorin MCPR, kun 4-6 vuotiailla on eri karheusarvoja (1900 MW, 4600 kg/s).



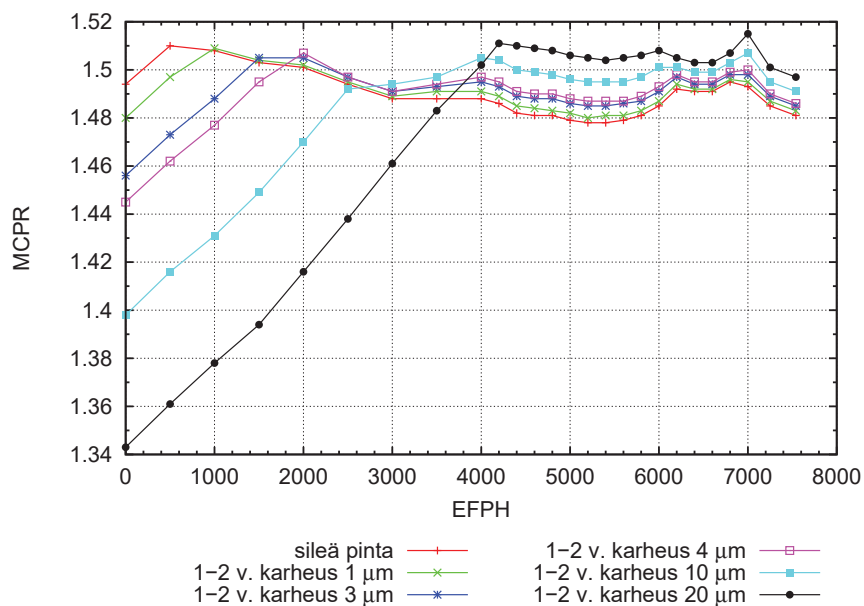
Kuva 73. Koko reaktorin MCPR-arvon ero sileän pinnan MCPR-arvoon (karhea tapaus - sileä tapaus), kun 4-6 vuotiailla on eri karheusarvoja (1900 MW, 4600 kg/s).



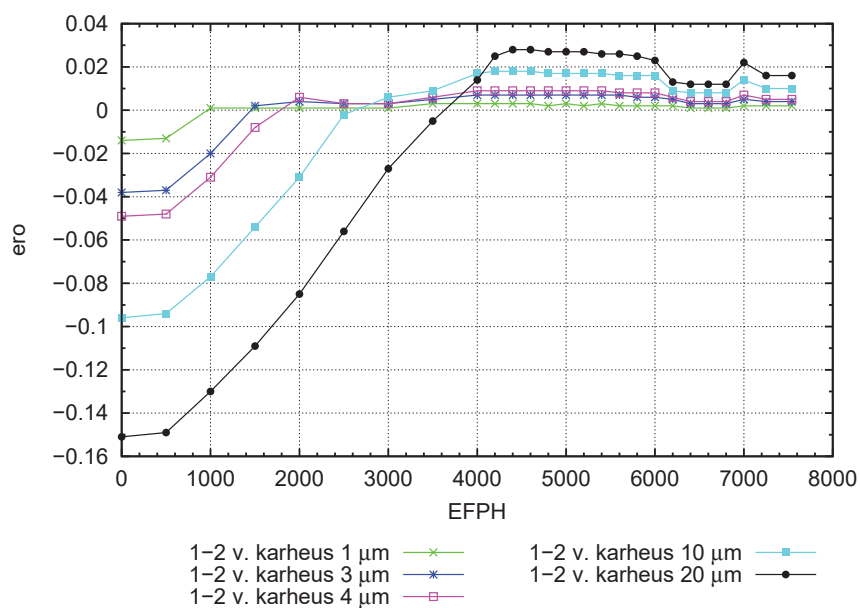
Kuva 74. Koko reaktorin MCPR, kun 0-1 vuotiailla on eri karheusarvoja (1750 MW, 4000 kg/s).



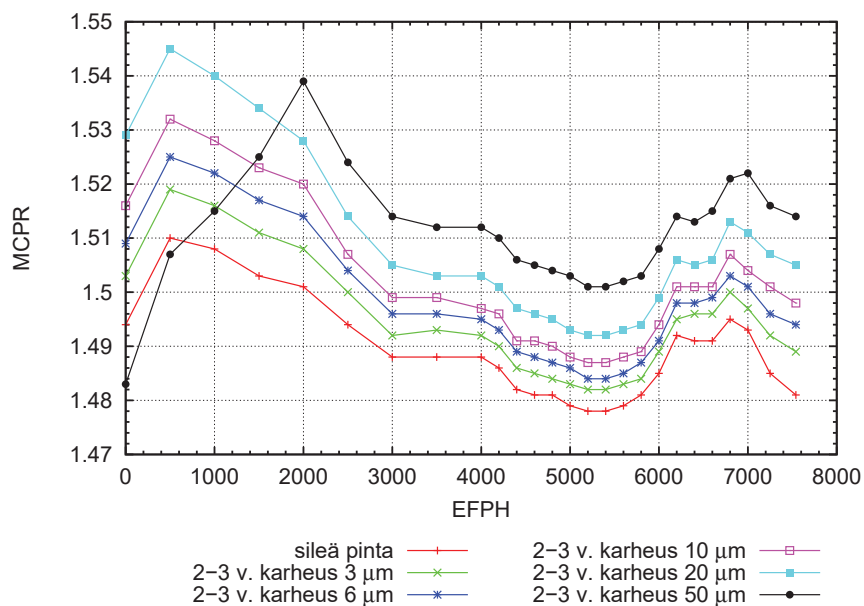
Kuva 75. Koko reaktorin MCPR-arvon ero sileän pinnan MCPR-arvoon (karhea tapaus - sileä tapaus), kun 0-1 vuotiailla on eri karheusarvoja (1750 MW, 4000 kg/s).



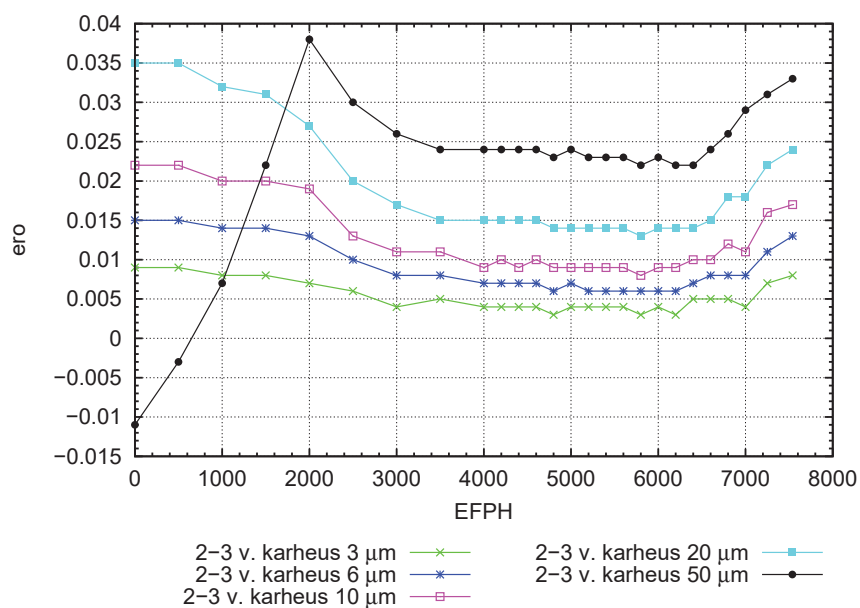
Kuva 76. Koko reaktorin MCPR, kun 1-2 vuotiailla on eri karheusarvoja (1750 MW, 4000 kg/s).



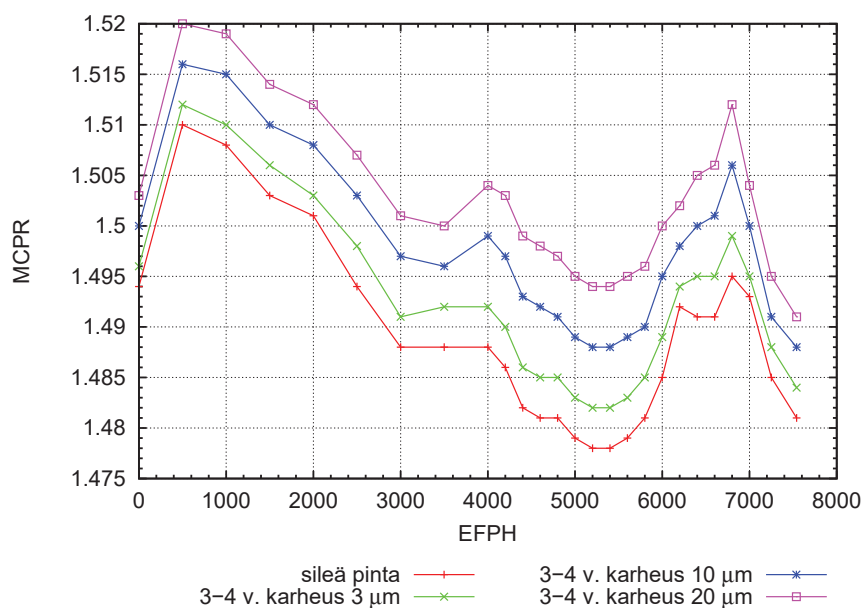
Kuva 77. Koko reaktorin MCPR-arvon ero sileän pinnan MCPR-arvoon (karhea tapaus - sileä tapaus), kun 1-2 vuotiailla on eri karheusarvoja (1750 MW, 4000 kg/s).



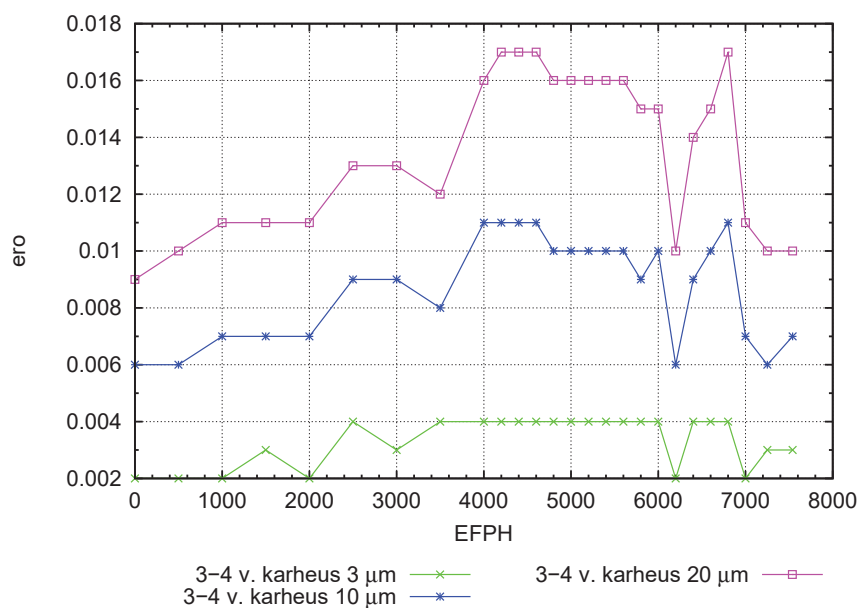
Kuva 78. Koko reaktorin MCPR, kun 2-3 vuotiailla on eri karheusarvoja (1750 MW, 4000 kg/s).



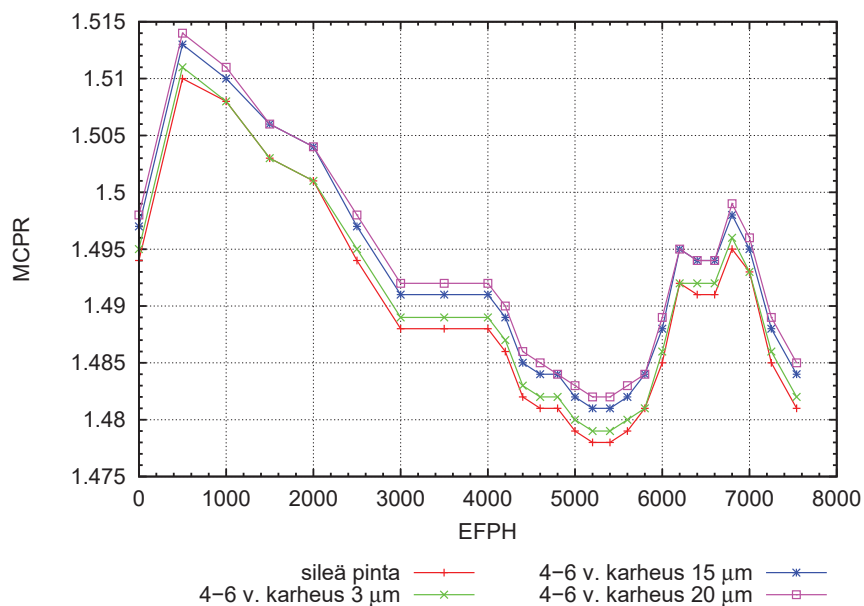
Kuva 79. Koko reaktorin MCPR-arvon ero sileän pinnan MCPR-arvoon (karhea tapaus - sileä tapaus), kun 2-3 vuotiailla on eri karheusarvoja (1750 MW, 4000 kg/s).



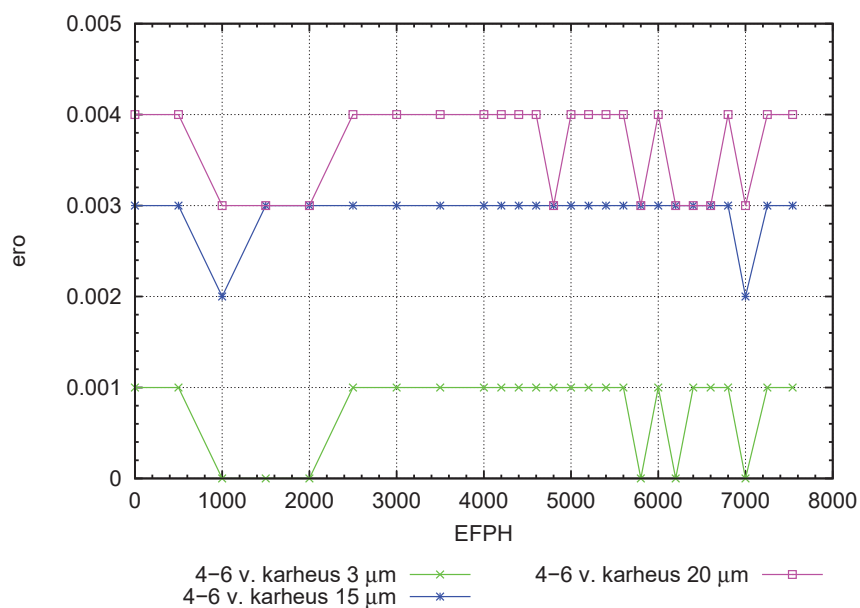
Kuva 80. Koko reaktorin MCPR, kun 3-4 vuotiailla on eri karheusarvoja (1750 MW, 4000 kg/s).



Kuva 81. Koko reaktorin MCPR-arvon ero sileän pinnan MCPR-arvoon (karhea tapaus - sileä tapaus), kun 3-4 vuotiailla on eri karheusarvoja (1750 MW, 4000 kg/s).

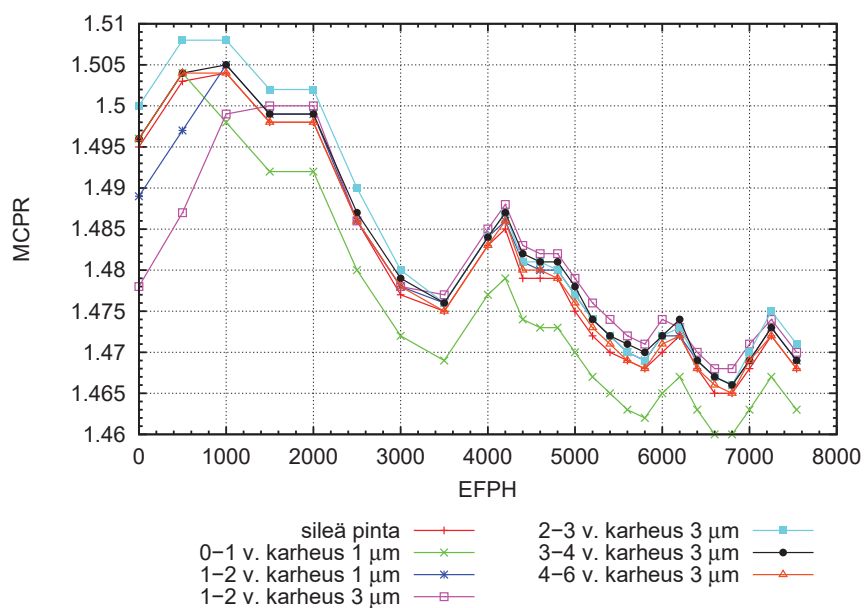


Kuva 82. Koko reaktorin MCPR, kun 4-6 vuotiailla on eri karheusarvoja (1750 MW, 4000 kg/s).

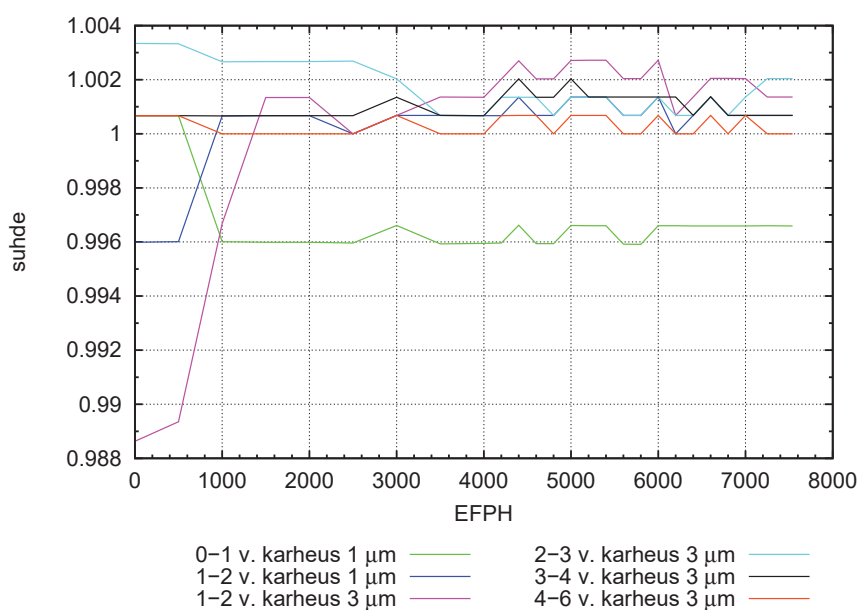


Kuva 83. Koko reaktorin MCPR-arvon ero sileän pinnan MCPR-arvoon (karhea tapaus - sileä tapaus), kun 4-6 vuotiailla on eri karheusarvoja (1750 MW, 4000 kg/s).

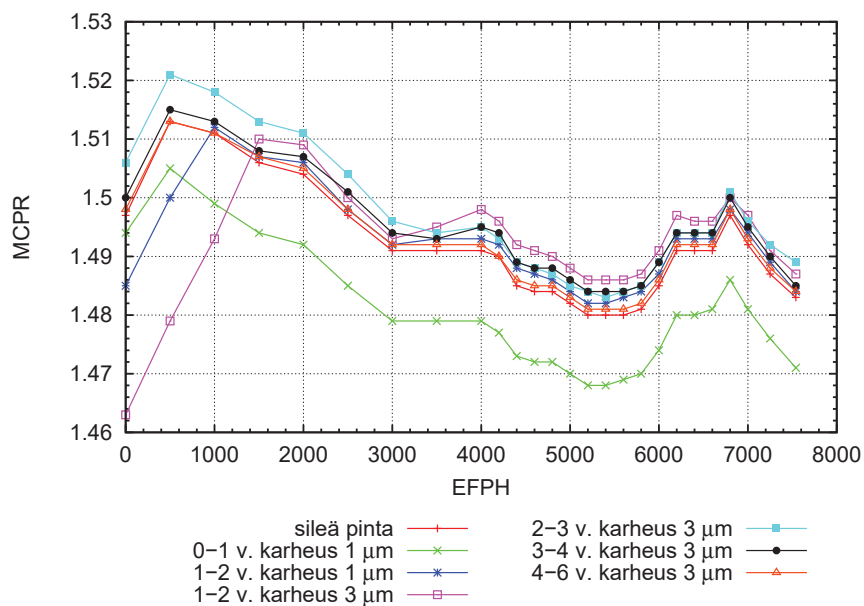
LIITE F: OL2C37 - KOKO REAKTORIN MCPR-ARVON MUUTOKSET, KUN ERI IKÄLUOKILLE ON ANNETTU MAKSIMIKARHEUS



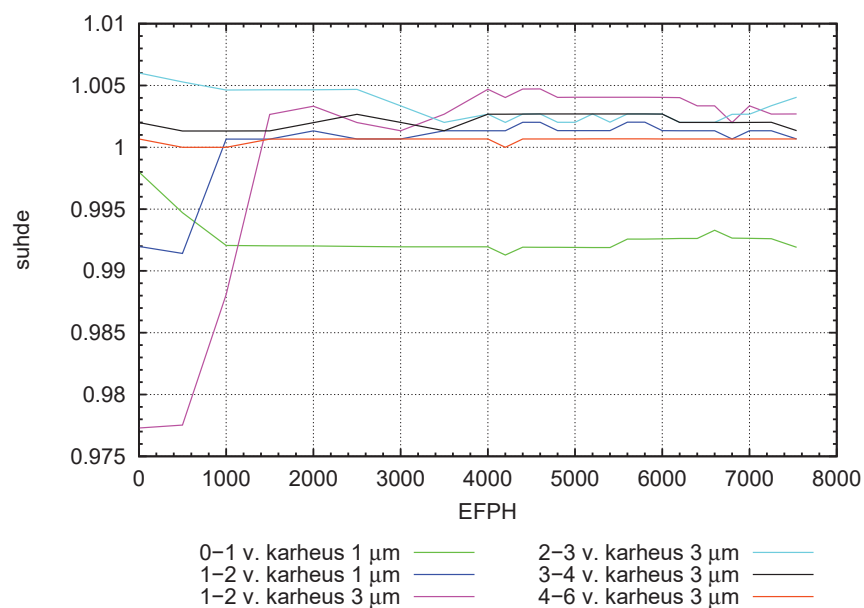
Kuva 84. Koko reaktorin MCPR, kun eri ikäluokille on annettu maksimikarheus (2500 MW, 7650 kg/s).



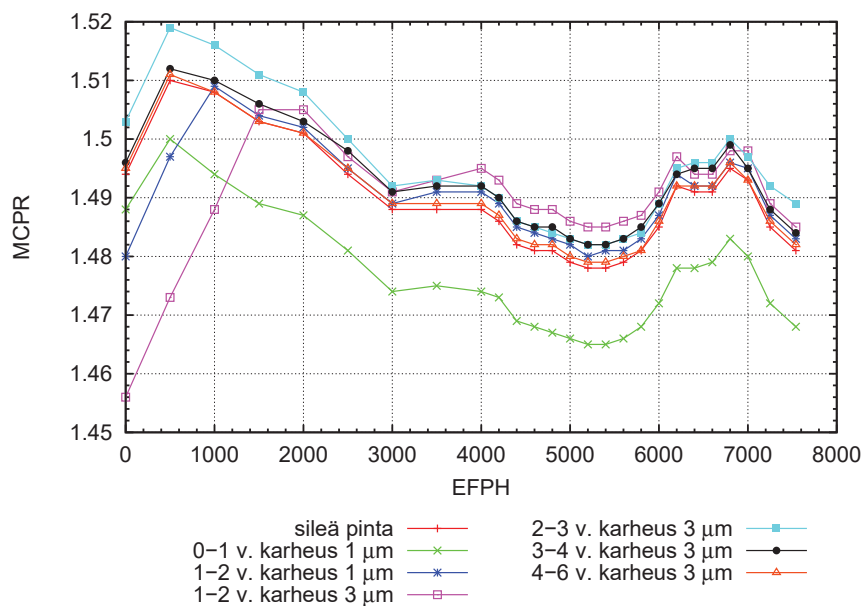
Kuva 85. Koko reaktorin MCPR:n suhde sileän pinnan MCPR-arvoon, kun eri ikäluokille on annettu maksimikarheus (2500 MW, 7650 kg/s).



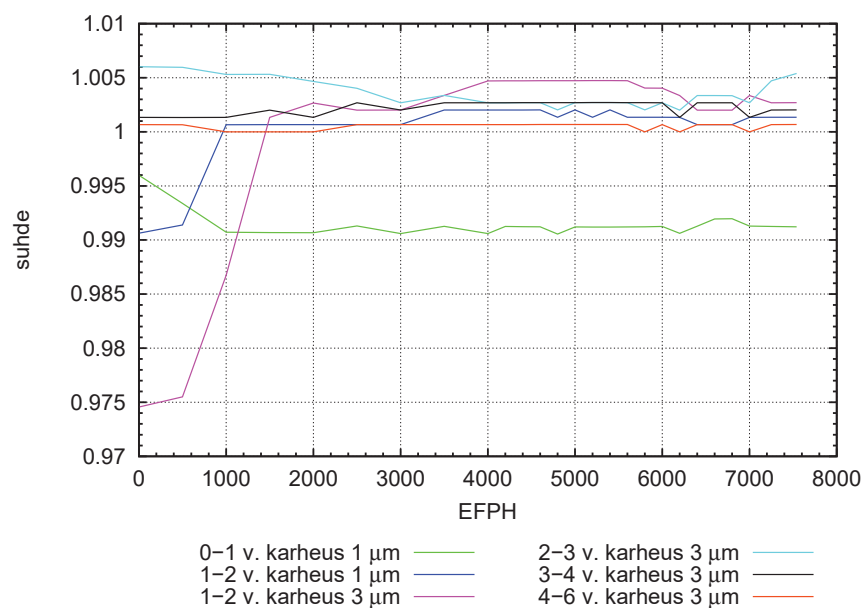
Kuva 86. Koko reaktorin MCPR, kun eri ikäluokille on annettu maksimikarheus (1900 MW, 4600 kg/s).



Kuva 87. Koko reaktorin MCPR:n suhde sileän pinnan MCPR-arvoon, kun eri ikäluokille on annettu maksimikarheus (1900 MW, 4600 kg/s).

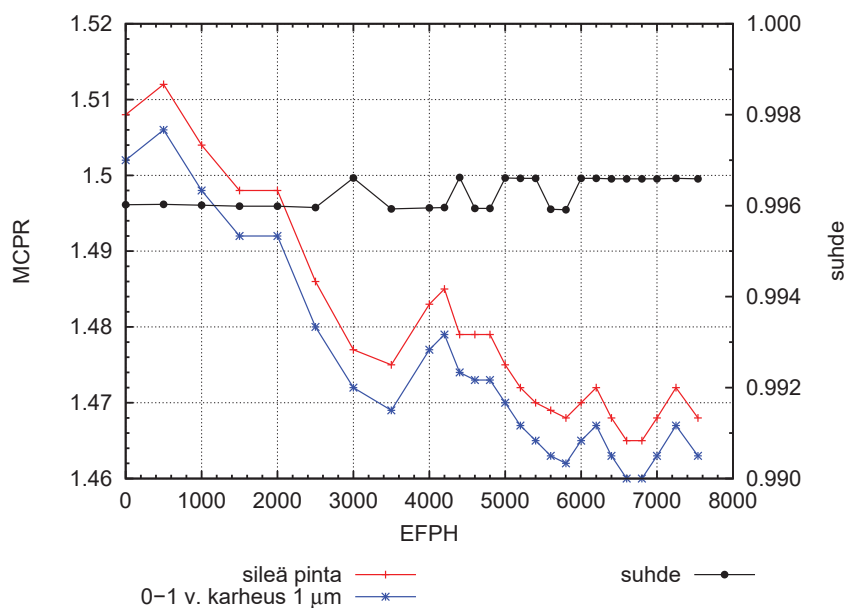


Kuva 88. Koko reaktorin MCPR, kun eri ikäluokille on annettu maksimikarheus (1750 MW, 4000 kg/s).

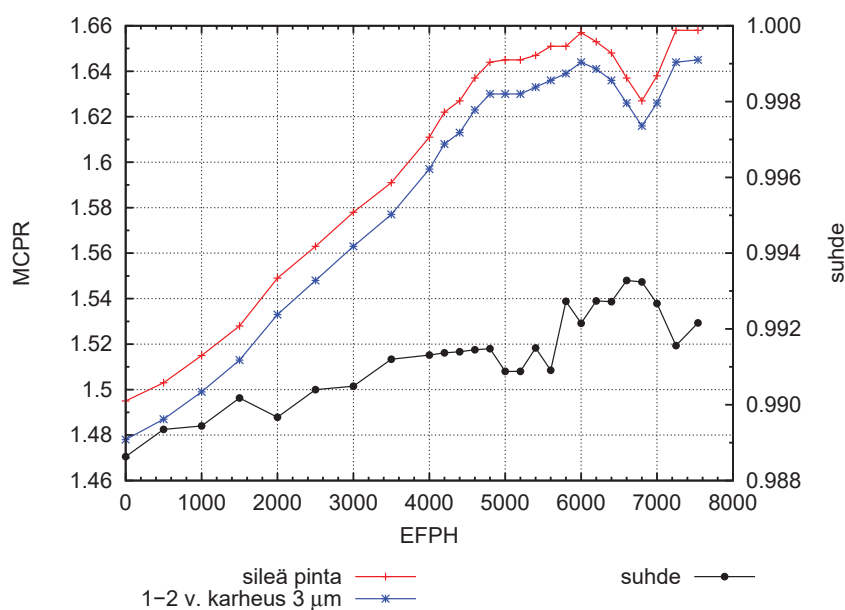


Kuva 89. Koko reaktorin MCPR:n suhde sileän pinnan MCPR-arvoon, kun eri ikäluokille on annettu maksimikarheus (1750 MW, 4000 kg/s).

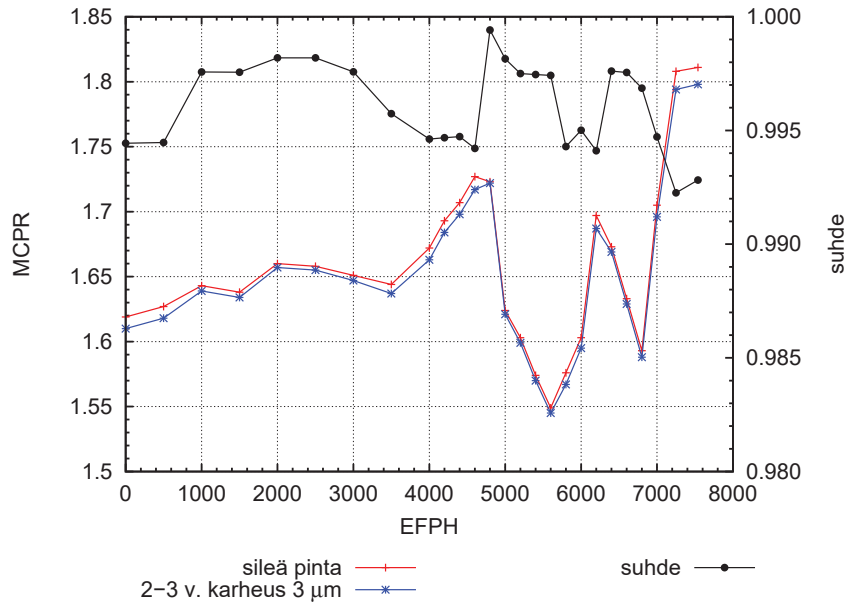
LIITE G: OL2C37 - ERI IKÄLUOKKIEN MCPR-ARVON MUUTTUMINEN, KUN IKÄLUOKALLE ON ANNETTU MAKSIMIKARHEUS



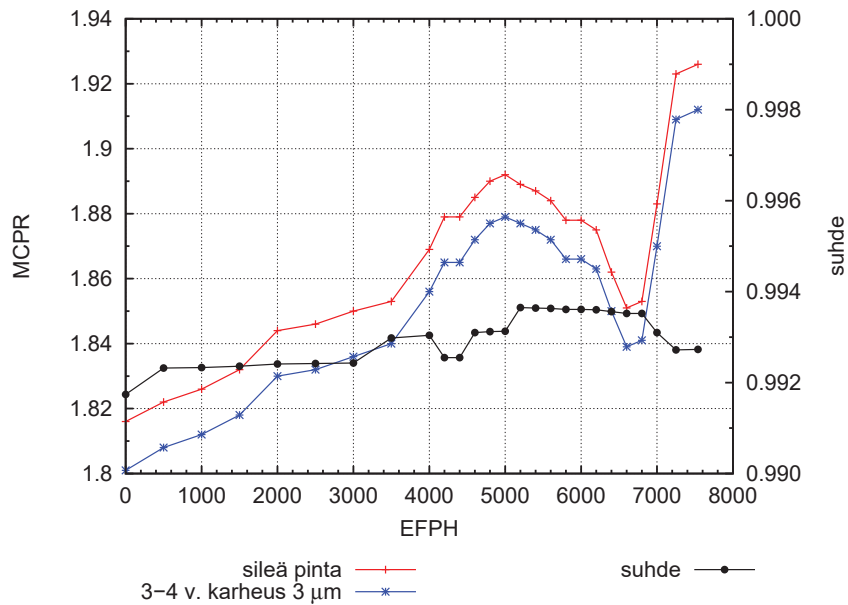
Kuva 90. 0-1 vuotiaiden polttoaine-elementtien MCPR sileälle pinnalle, MCPR karhealle pinnalle sekä karhean pinnan MCPR-arvon suhde sileän pinnan MCPR-arvoon, kun kyseisen ikäluokan pinnankarheus on maksimissaan (2500 MW, 7650 kg/s).



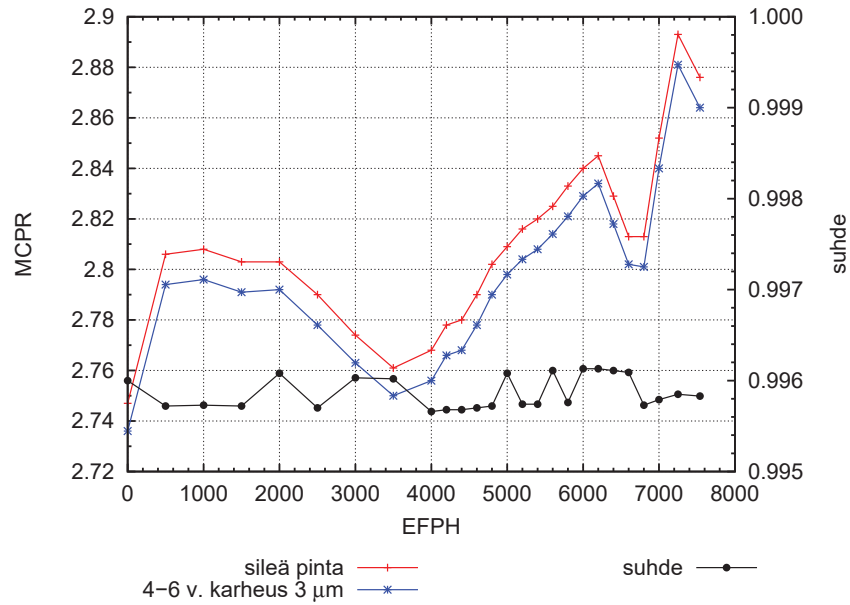
Kuva 91. 1-2 vuotiaiden polttoaine-elementtien MCPR sileälle pinnalle, MCPR karhealle pinnalle sekä karhean pinnan MCPR-arvon suhde sileän pinnan MCPR-arvoon, kun kyseisen ikäluokan pinnankarheus on maksimissaan (2500 MW, 7650 kg/s).



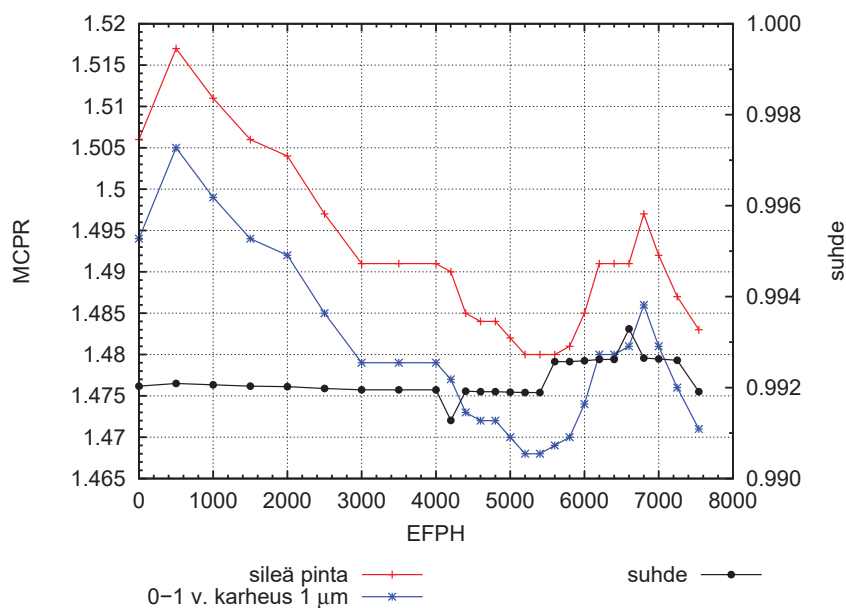
Kuva 92. 2-3 vuotiaiden polttoaine-elementtien MCPR sileälle pinnalle, MCPR karhealle pinnalle sekä karhean pinnan MCPR-arvon suhde sileän pinnan MCPR-arvoon, kun kyseisen ikäluokan pinnankarheus on maksimissaan (2500 MW, 7650 kg/s).



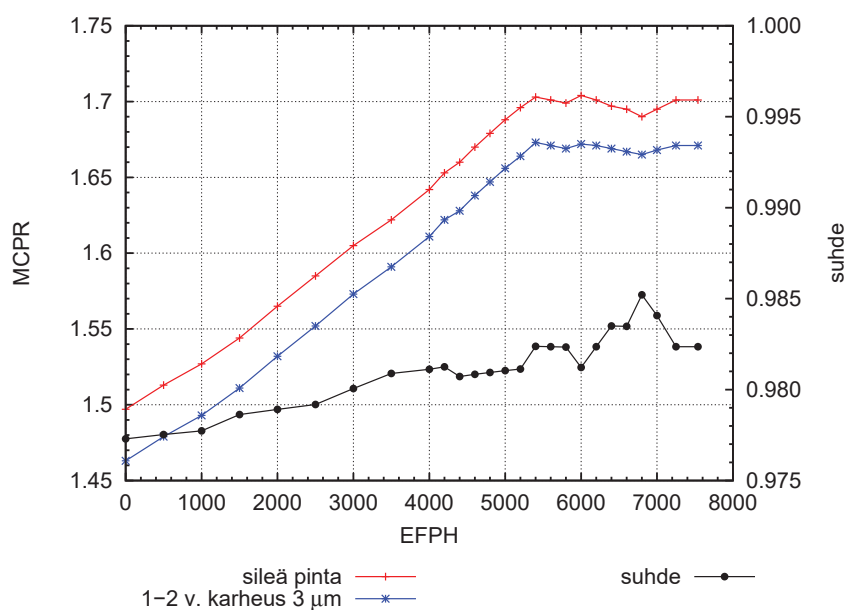
Kuva 93. 3-4 vuotiaiden polttoaine-elementtien MCPR sileälle pinnalle, MCPR karhealle pinnalle sekä karhean pinnan MCPR-arvon suhde sileän pinnan MCPR-arvoon, kun kyseisen ikäluokan pinnankarheus on maksimissaan (2500 MW, 7650 kg/s).



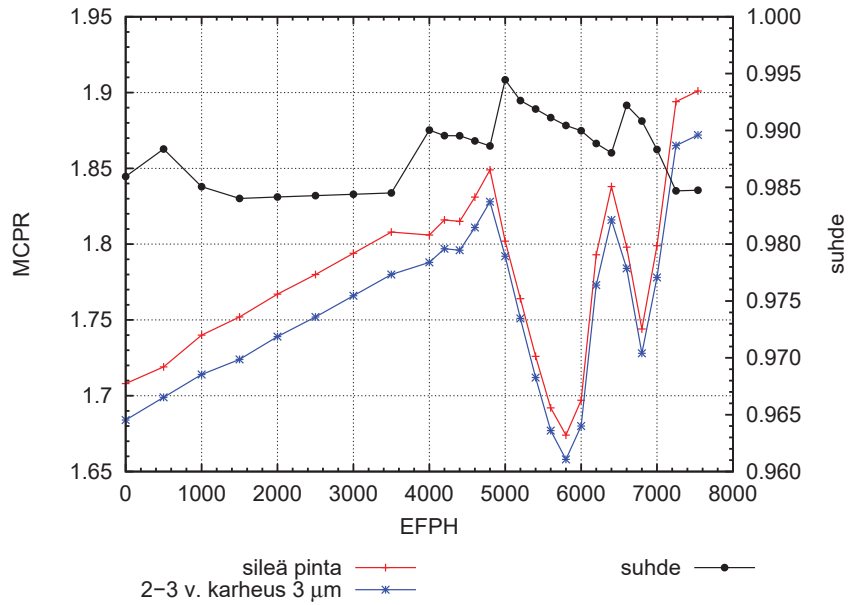
Kuva 94. 4-6 vuotiaiden polttoaine-elementtien MCPR sileälle pinnalle, MCPR karhealle pinnalle sekä karhean pinnan MCPR-arvon suhde sileän pinnan MCPR-arvoon, kun kyseisen ikäluokan pinnankarheus on maksimissaan (2500 MW, 7650 kg/s).



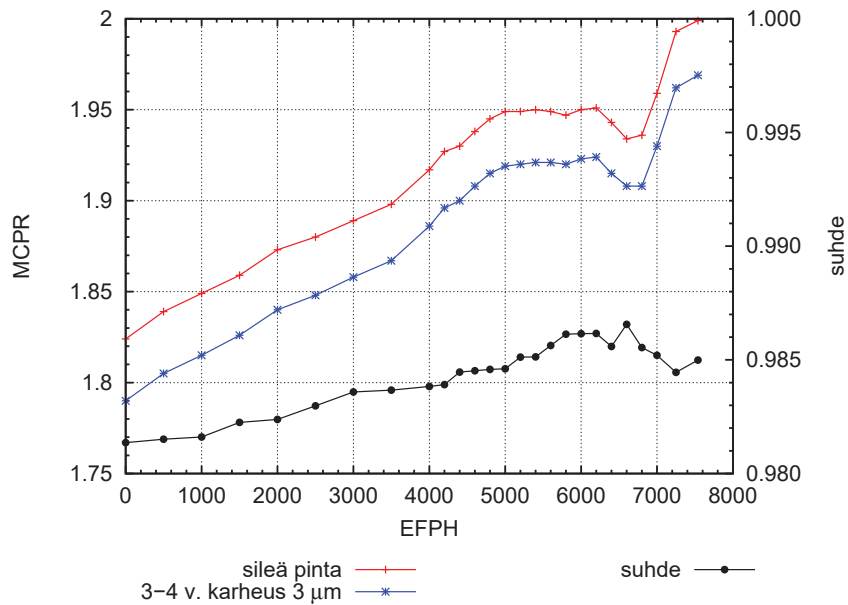
Kuva 95. 0-1 vuotiaiden polttoaine-elementtien MCPR sileälle pinnalle, MCPR karhealle pinnalle sekä karhean pinnan MCPR-arvon suhde sileän pinnan MCPR-arvoon, kun kyseisen ikäluokan pinnankarheus on maksimissaan (1900 MW, 4600 kg/s).



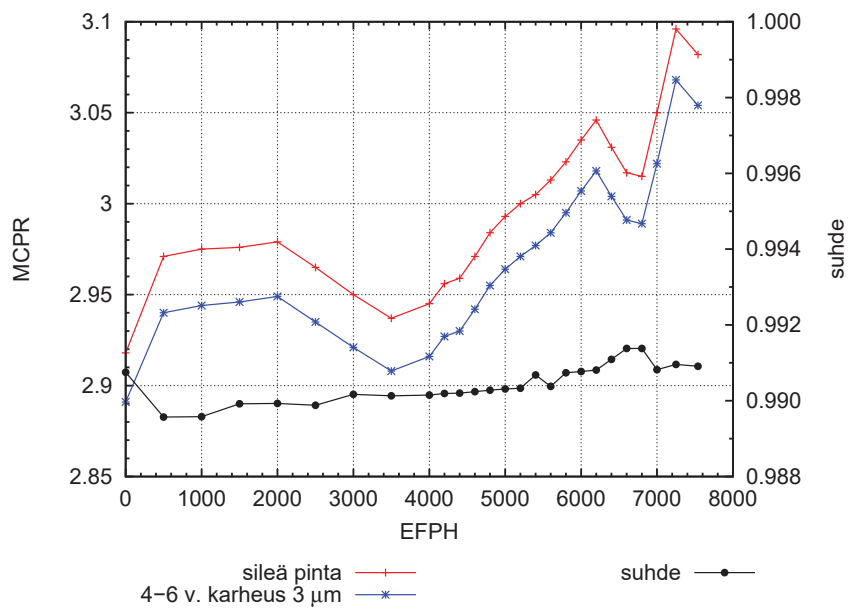
Kuva 96. 1-2 vuotiaiden polttoaine-elementtien MCPR sileälle pinnalle, MCPR karhealle pinnalle sekä karhean pinnan MCPR-arvon suhde sileän pinnan MCPR-arvoon, kun kyseisen ikäluokan pinnankarheus on maksimissaan (1900 MW, 4600 kg/s).



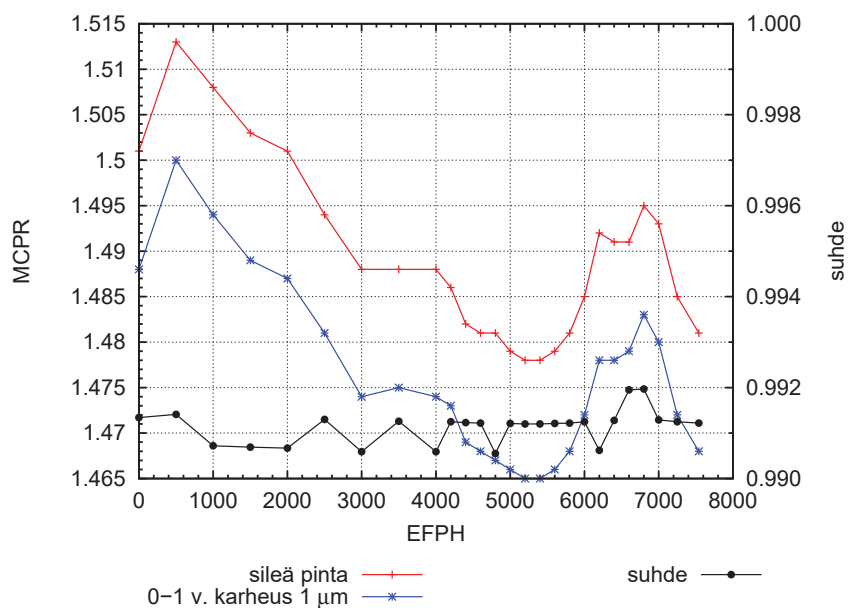
Kuva 97. 2-3 vuotiaiden polttoaine-elementtien MCPR sileälle pinnalle, MCPR karhealle pinnalle sekä karhean pinnan MCPR-arvon suhde sileän pinnan MCPR-arvoon, kun kyseisen ikäluokan pinnankarheus on maksimissaan (1900 MW, 4600 kg/s).



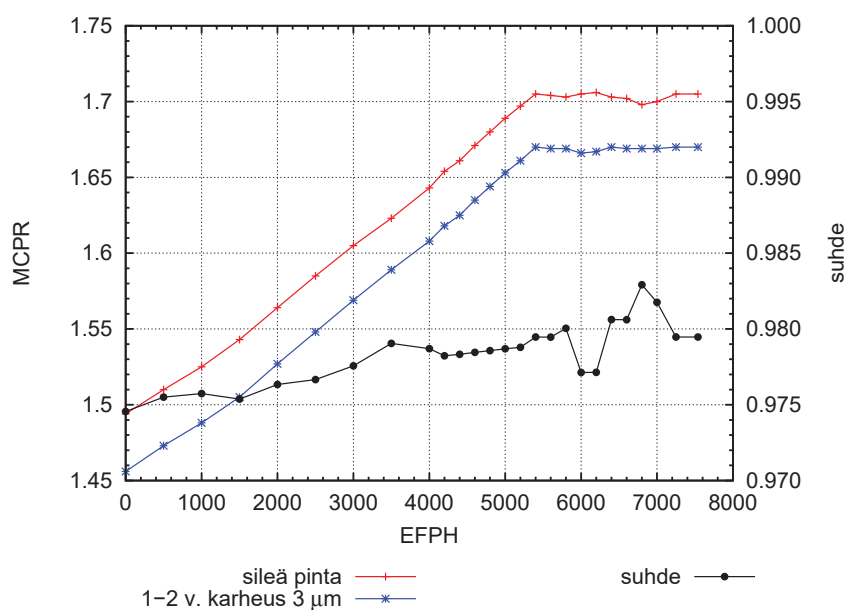
Kuva 98. 3-4 vuotiaiden polttoaine-elementtien MCPR sileälle pinnalle, MCPR karhealle pinnalle sekä karhean pinnan MCPR-arvon suhde sileän pinnan MCPR-arvoon, kun kyseisen ikäluokan pinnankarheus on maksimissaan (1900 MW, 4600 kg/s).



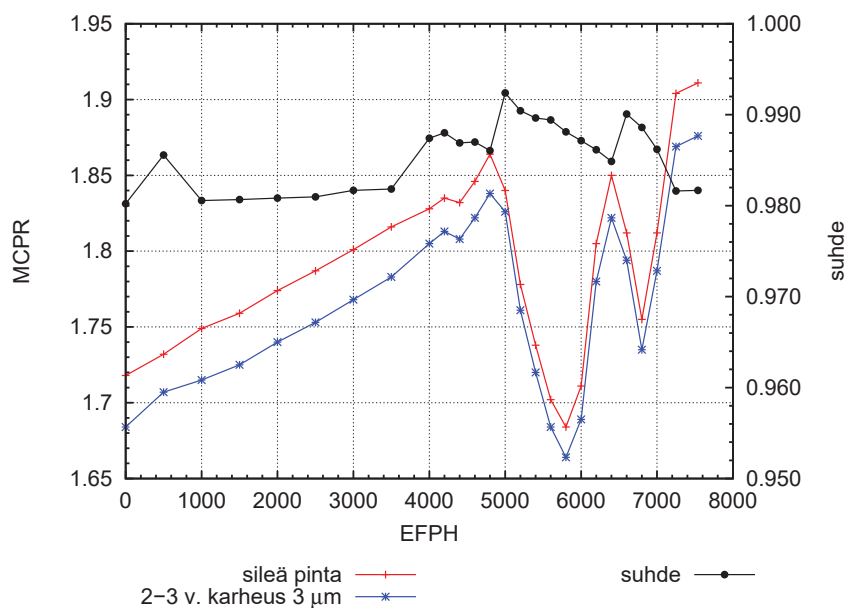
Kuva 99. 4–6 vuotiaiden polttoaine-elementtien MCPR sileälle pinnalle, MCPR karhealle pinnalle sekä karhean pinnan MCPR-arvon suhde sileän pinnan MCPR-arvoon, kun kyseisen ikäluokan pinnankarheus on maksimissaan (1900 MW, 4600 kg/s).



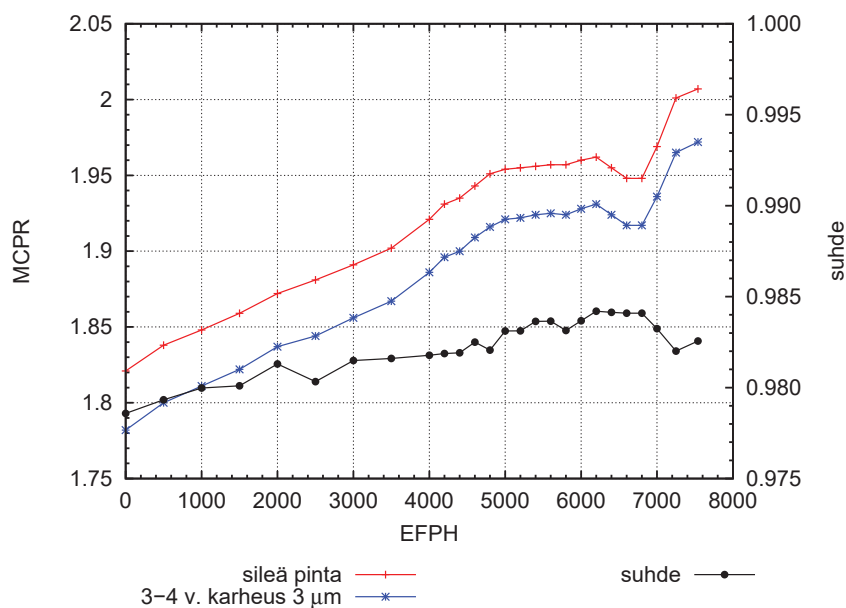
Kuva 100. 0-1 vuotiaiden polttoaine-elementtien MCPR sileälle pinnalle, MCPR karhealle pinnalle sekä karhean pinnan MCPR-arvon suhde sileän pinnan MCPR-arvoon, kun kyseisen ikäluokan pinnankarheus on maksimissaan (1750 MW, 4000 kg/s).



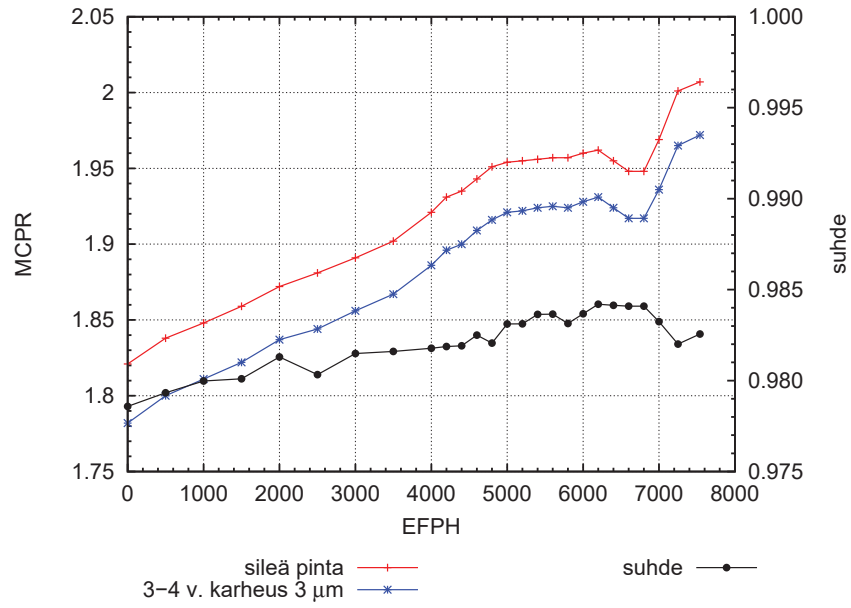
Kuva 101. 1-2 vuotiaiden polttoaine-elementtien MCPR sileälle pinnalle, MCPR karhealle pinnalle sekä karhean pinnan MCPR-arvon suhde sileän pinnan MCPR-arvoon, kun kyseisen ikäluokan pinnankarheus on maksimissaan (1750 MW, 4000 kg/s).



Kuva 102. 2-3 vuotiaiden polttoaine-elementtien MCPR sileälle pinnalle, MCPR karhealle pinnalle sekä karhean pinnan MCPR-arvon suhde sileän pinnan MCPR-arvoon, kun kyseisen ikäluokan pinnankarheus on maksimissaan (1750 MW, 4000 kg/s).



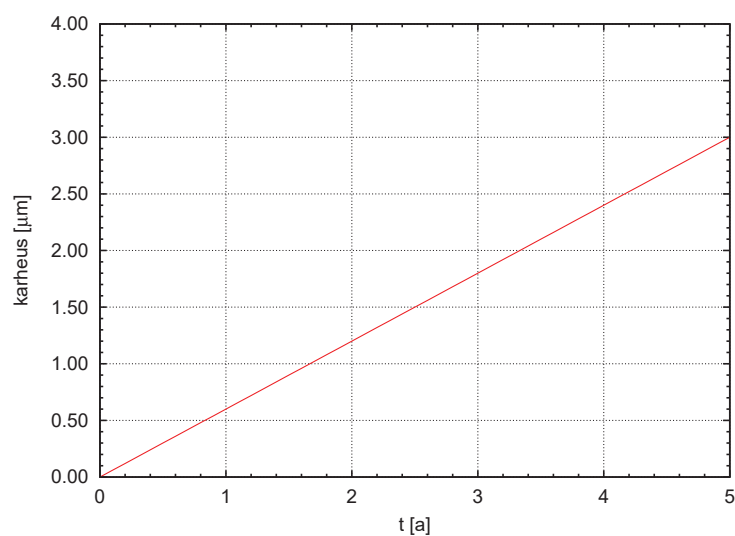
Kuva 103. 3-4 vuotiaiden polttoaine-elementtien MCPR sileälle pinnalle, MCPR karhealle pinnalle sekä karhean pinnan MCPR-arvon suhde sileän pinnan MCPR-arvoon, kun kyseisen ikäluokan pinnankarheus on maksimissaan (1750 MW, 4000 kg/s).



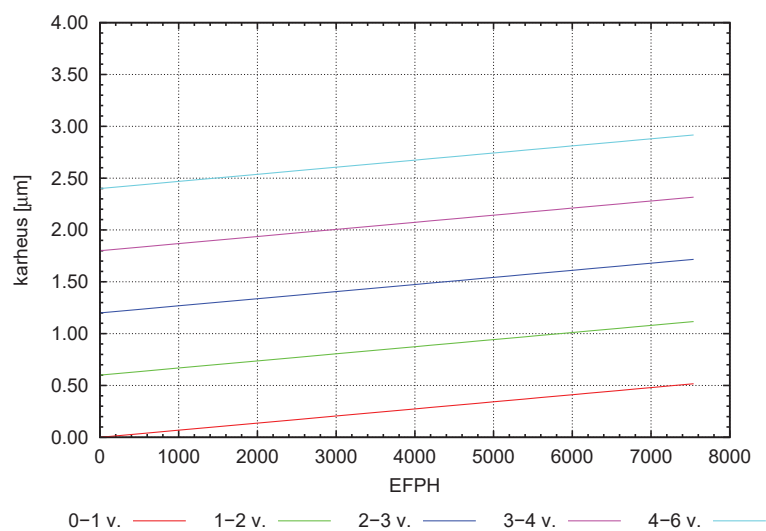
Kuva 104. 4–6 vuotiaiden polttoaine-elementtien MCPR sileälle pinnalle, MCPR karhealle pinnalle sekä karhean pinnan MCPR-arvon suhde sileän pinnan MCPR-arvoon, kun kyseisen ikäluokan pinnankarheus on maksimissaan (1750 MW, 4000 kg/s).

LIITE H: OL2C37 - CPR:N JA AKTIIVIVIRTAUKSEN MUUTOKSET, KUN KARHEUS KASVAA AJAN FUNKTIONA

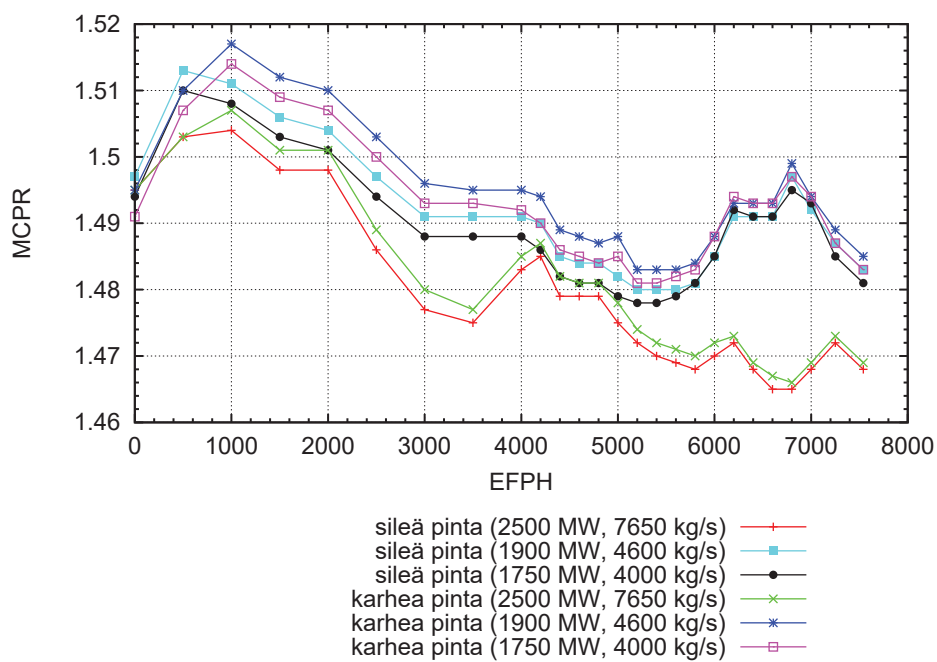
Funktio 1



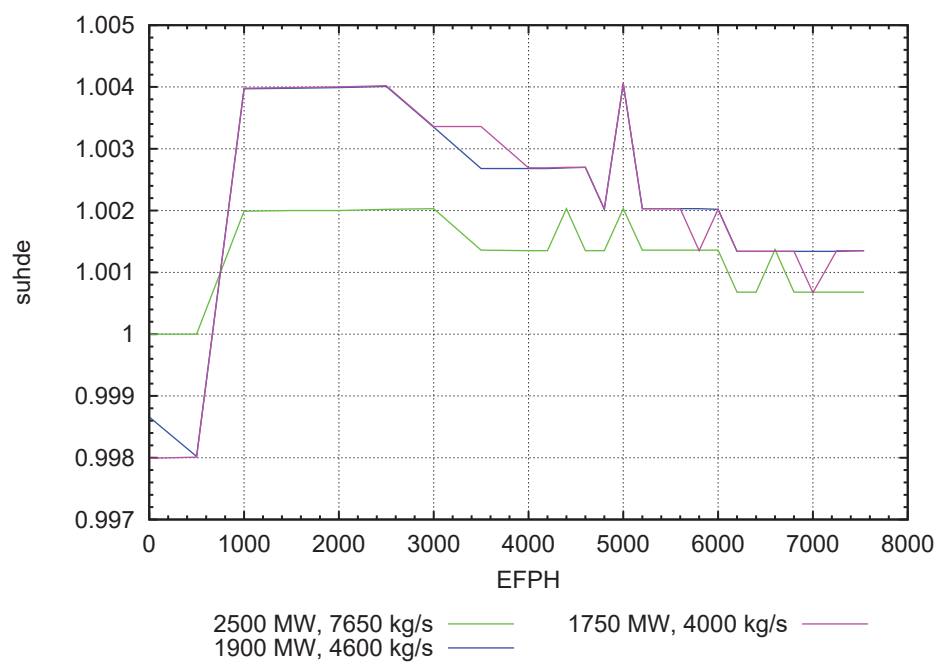
Kuva 105. Karheus ajan funktiona.



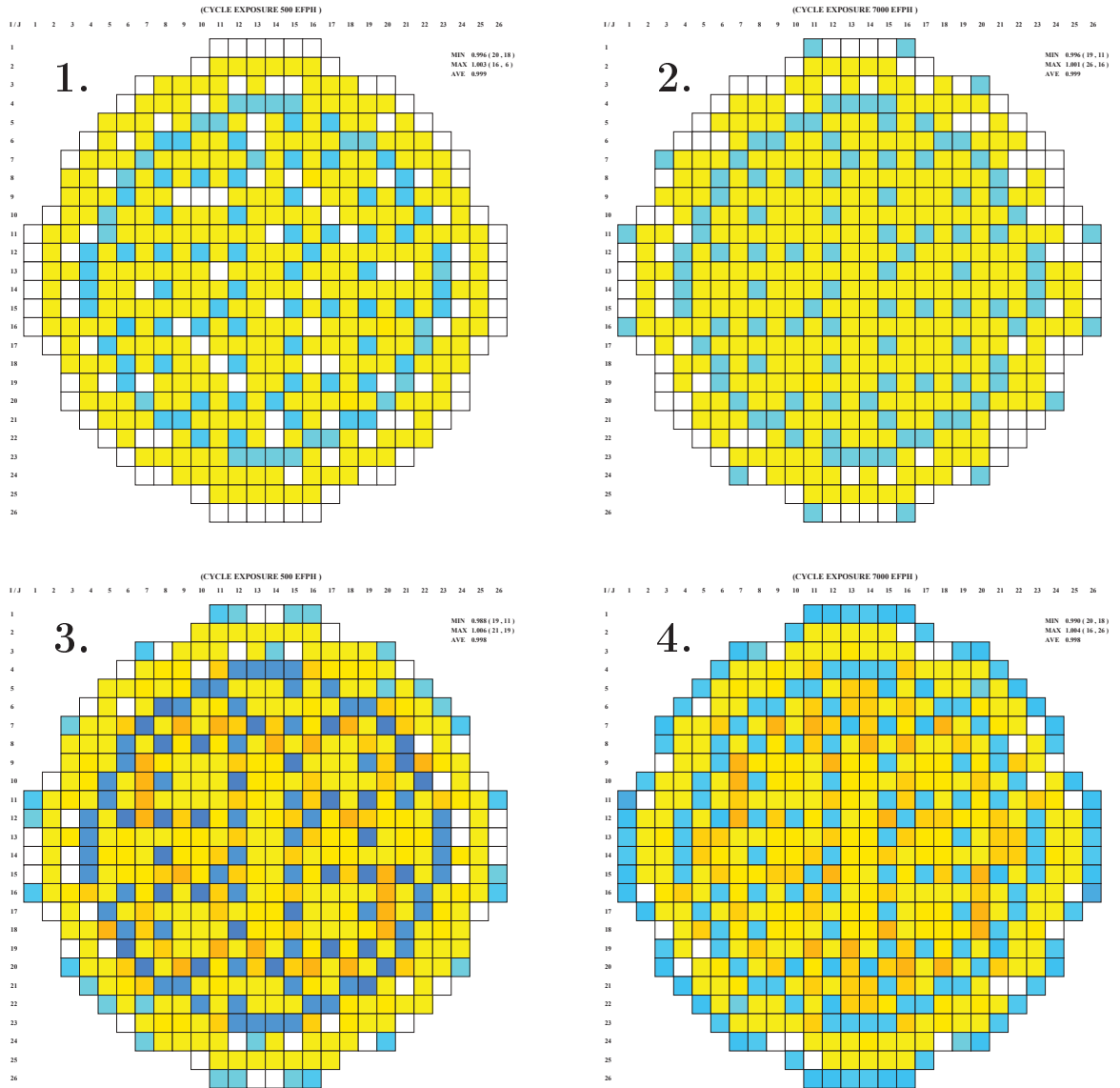
Kuva 106. Karheus ajan funktiona eri ikäluokille.



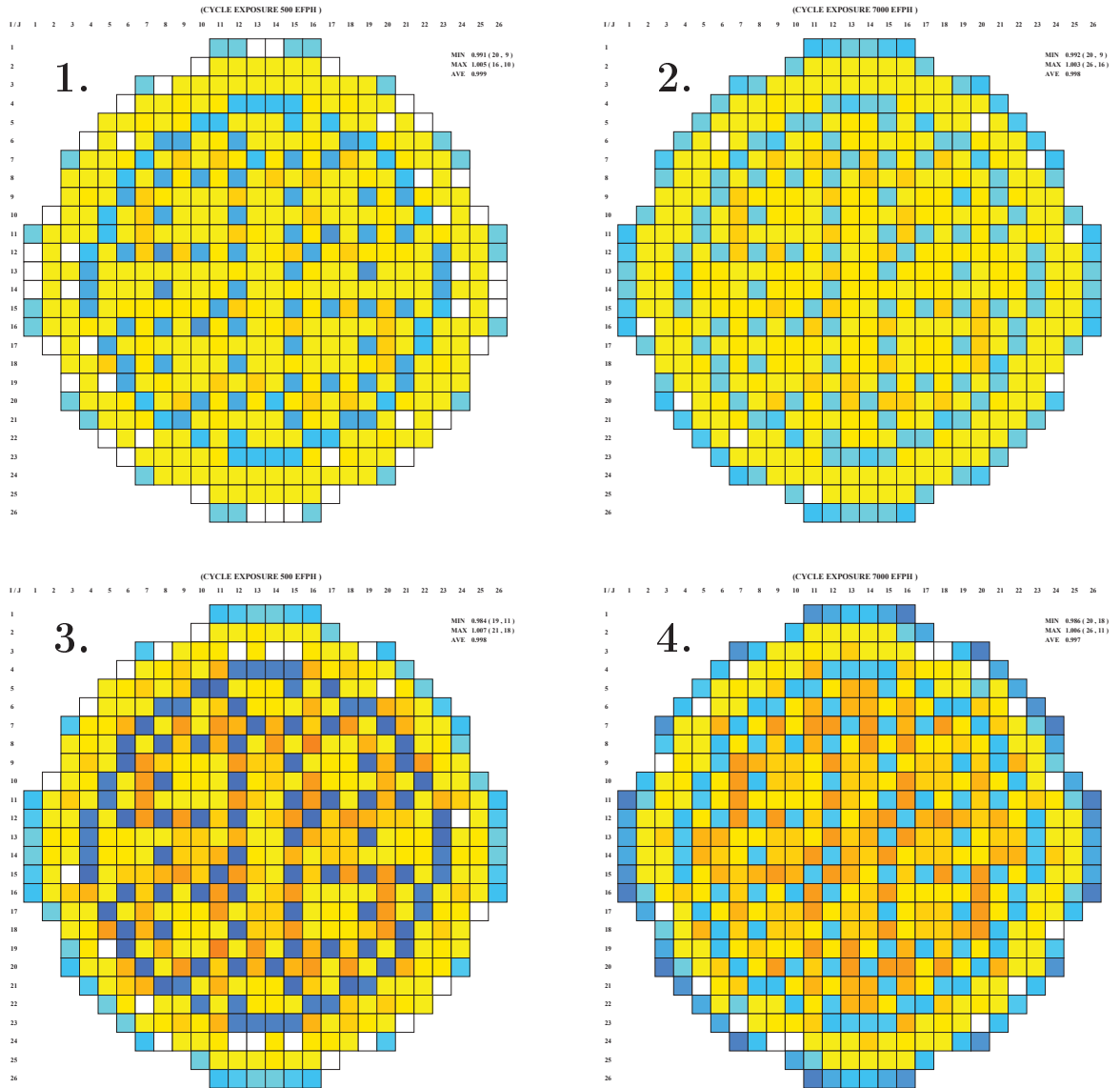
Kuva 107. Reaktorin MCPR-arvot sileälle pinnalle ja karhealle pinnalle eri ajopisteissä.



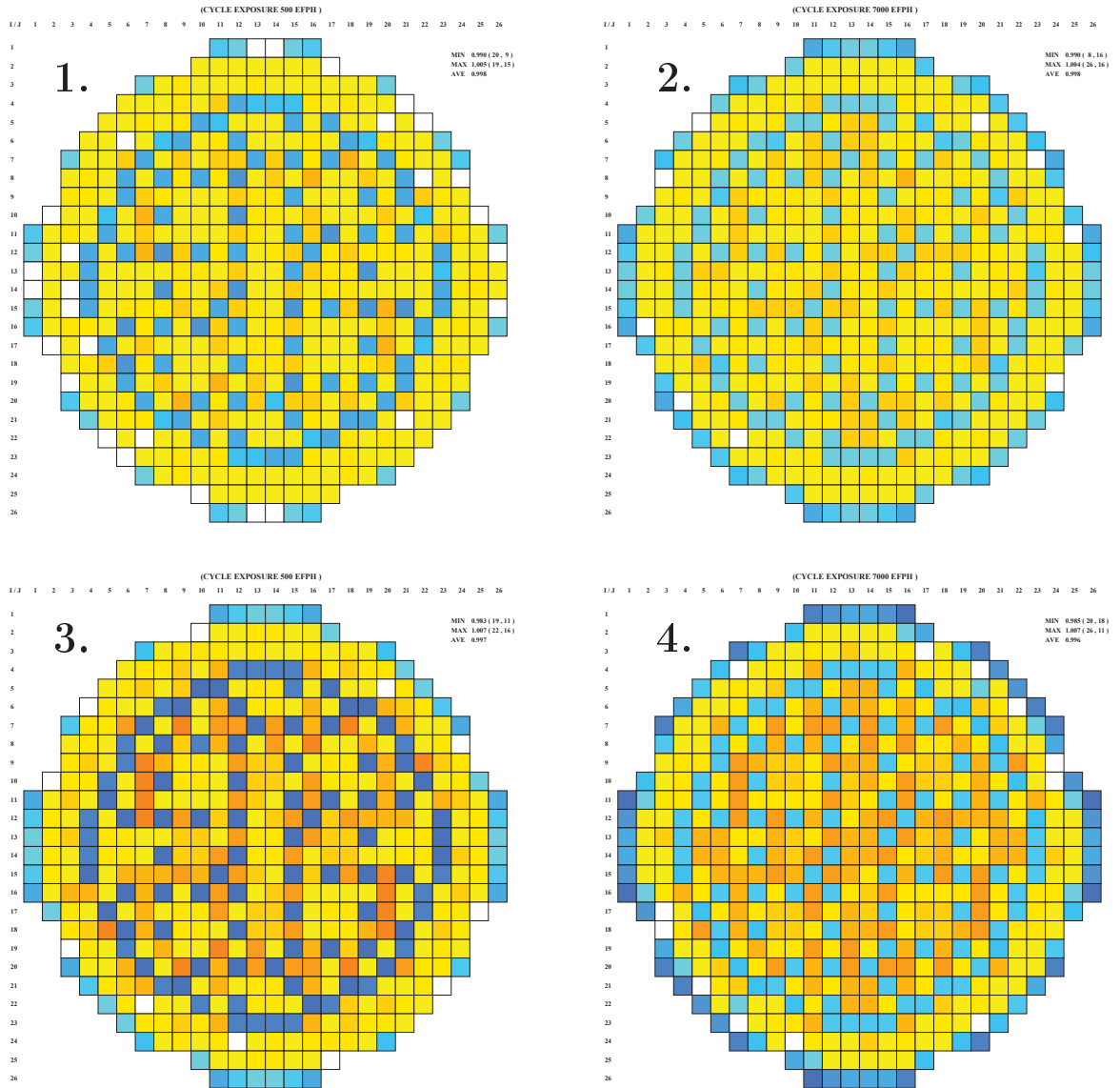
Kuva 108. Reaktorin MCPR-arvon suhde sileän pinnan MCPR-arvoon eri ajopisteissä.



Kuva 109. Kuvat vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas: nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään kohdassa 500 EFPH, nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään kohdassa 7000 EFPH, nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen kohdassa 500 EFPH, nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen kohdassa 7000 EFPH, kun karheus kasvaa funktion 1 mukaan (2500 MW, 7650 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvua sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.

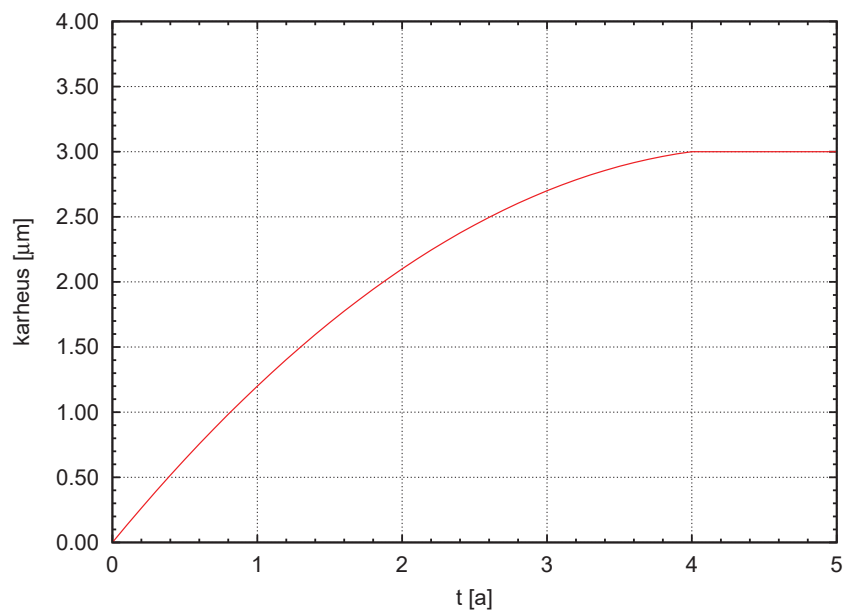


Kuva 110. Kuvat vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas: nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään kohdassa 500 EFPH, nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään kohdassa 7000 EFPH, nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen kohdassa 500 EFPH, nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen kohdassa 7000 EFPH, kun karheus kasvaa funktion 1 mukaan (1900 MW, 4600 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvua sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.

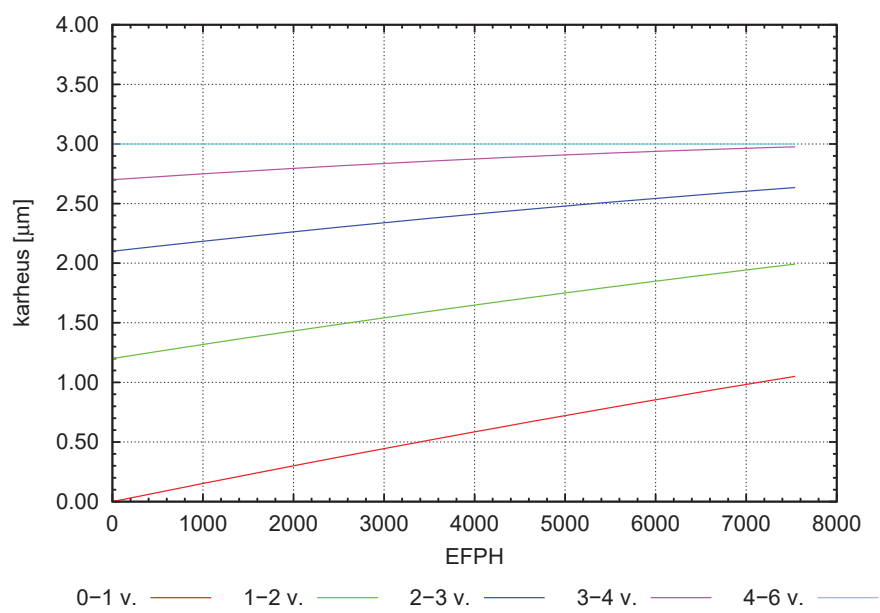


Kuva 111. Kuvat vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas: nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään kohdassa 500 EFPH, nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään kohdassa 7000 EFPH, nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen kohdassa 500 EFPH, nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen kohdassa 7000 EFPH, kun karheus kasvaa funktion 1 mukaan (1750 MW, 4000 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvua sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.

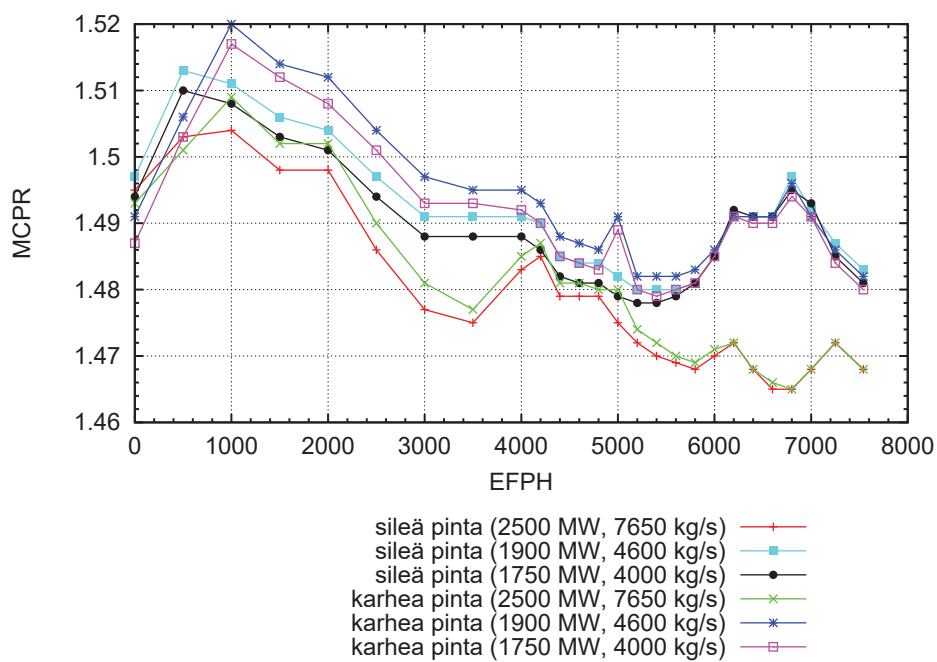
Funktio 2



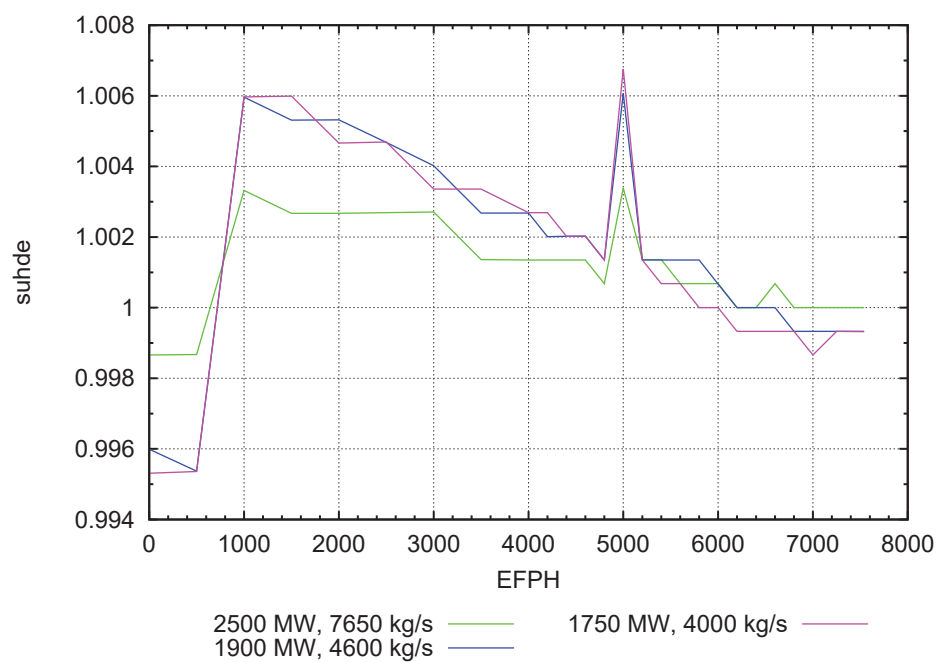
Kuva 112. Karheus ajan funktiona.



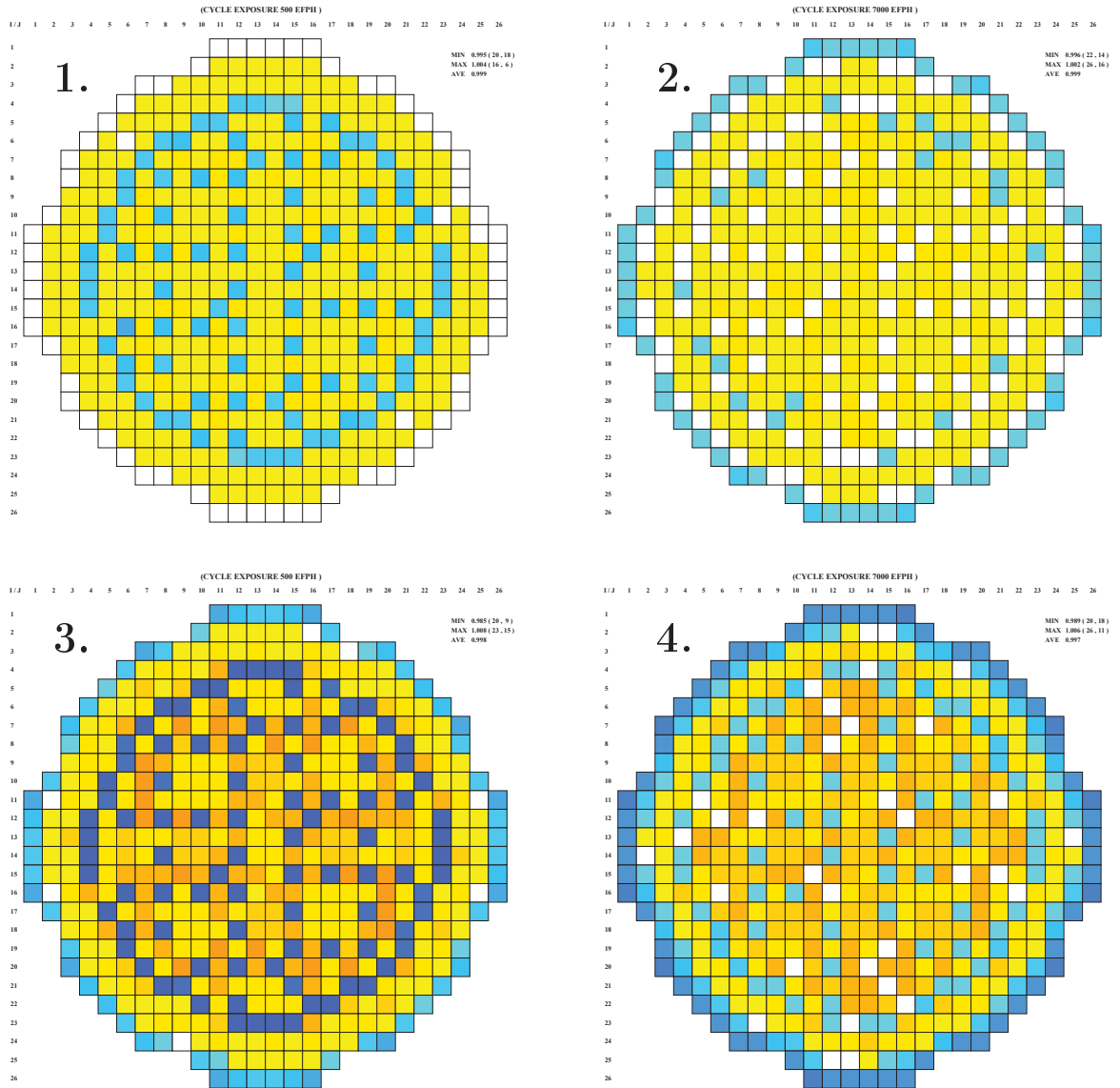
Kuva 113. Karheus ajan funktiona eri ikäluokille.



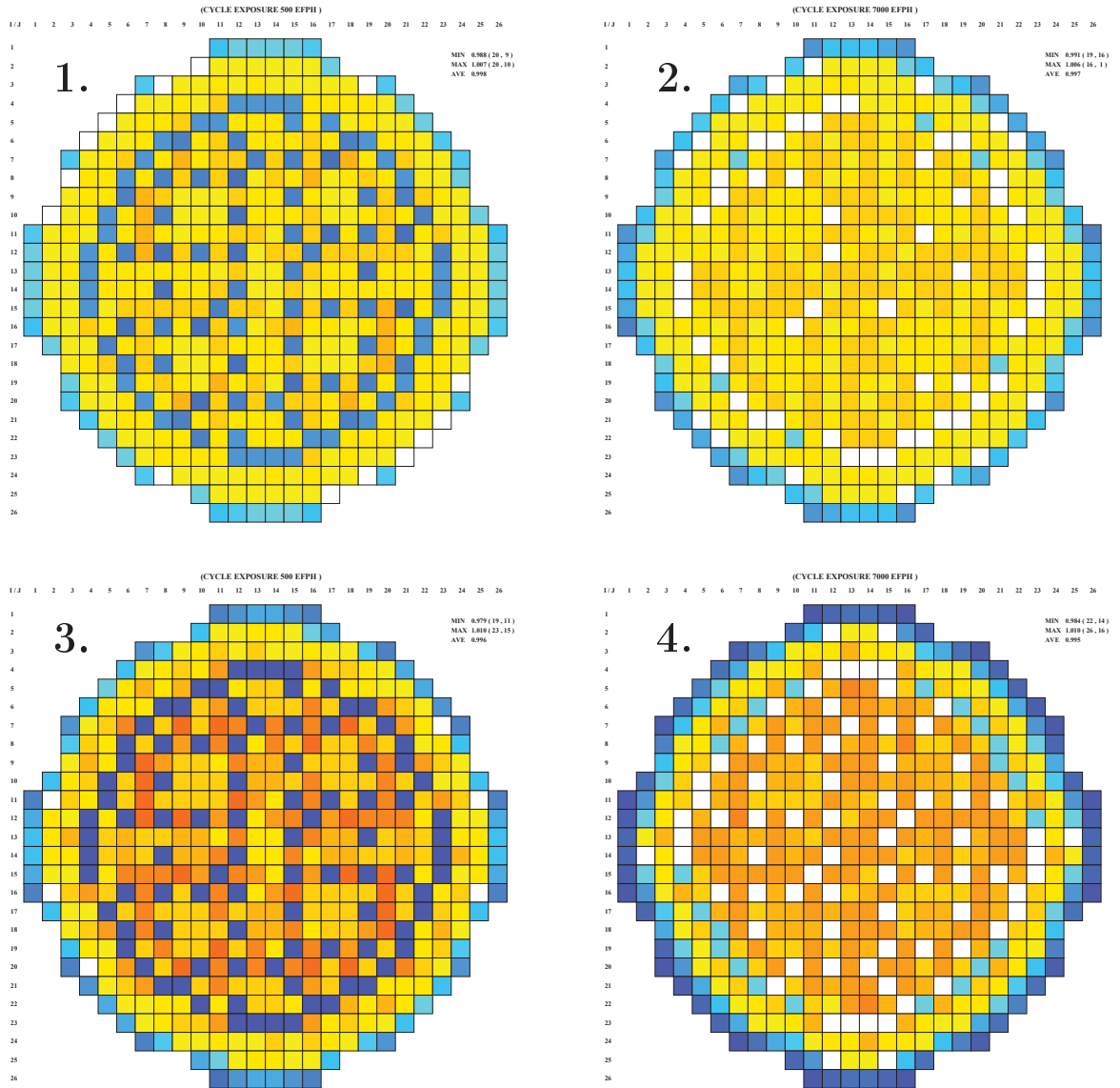
Kuva 114. Reaktorin MCPR-arvot sileälle pinnalle ja karhealle pinnalle eri ajopisteissä.



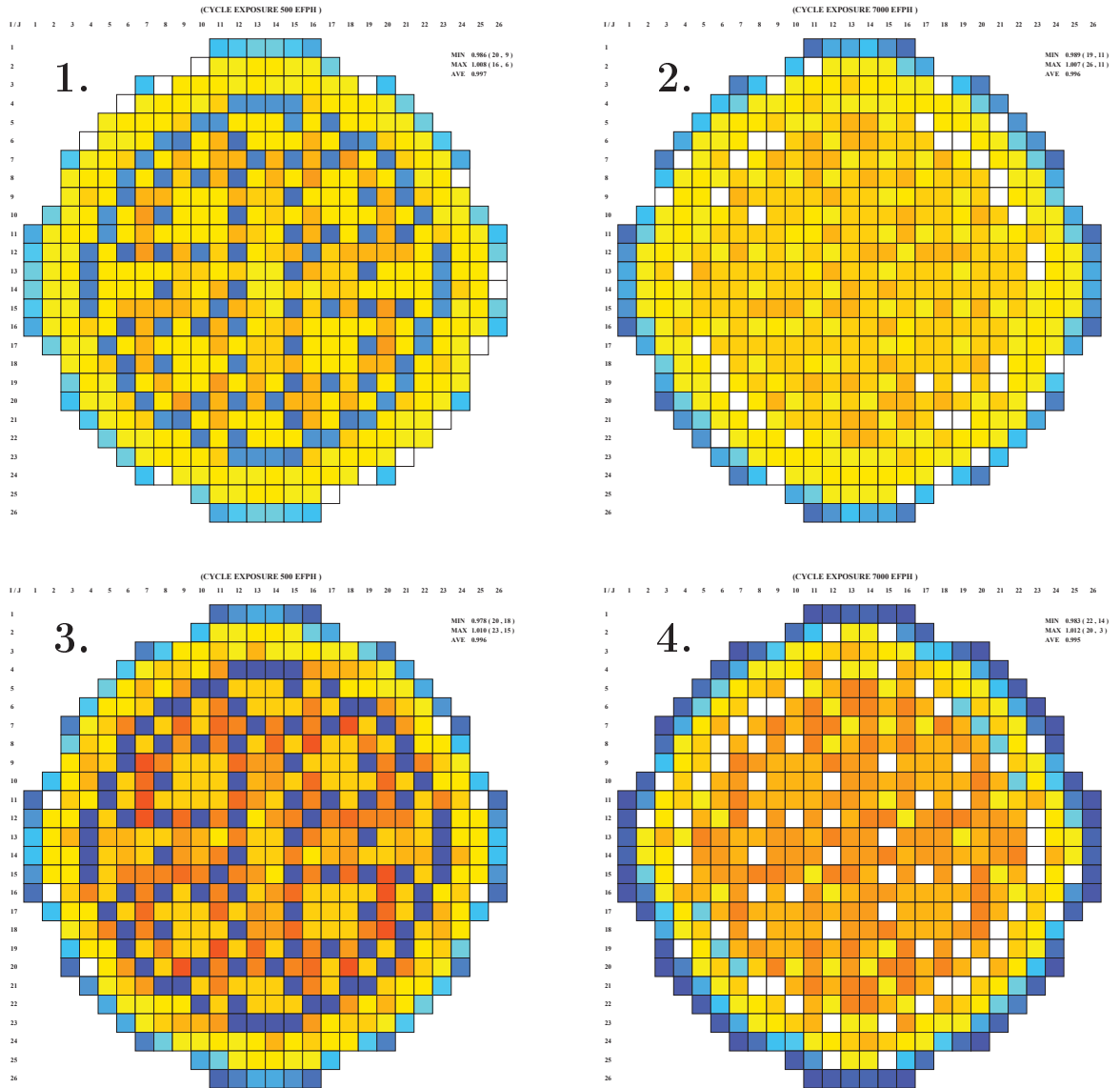
Kuva 115. Reaktorin MCPR-arvon suhde sileän pinnan MCPR-arvoon eri ajopisteissä.



Kuva 116. Kuvat vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas: nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään kohdassa 500 EFPH, nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään kohdassa 7000 EFPH, nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen kohdassa 500 EFPH, nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen kohdassa 7000 EFPH, kun karheus kasvaa funktion 2 mukaan (2500 MW, 7650 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvu sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.

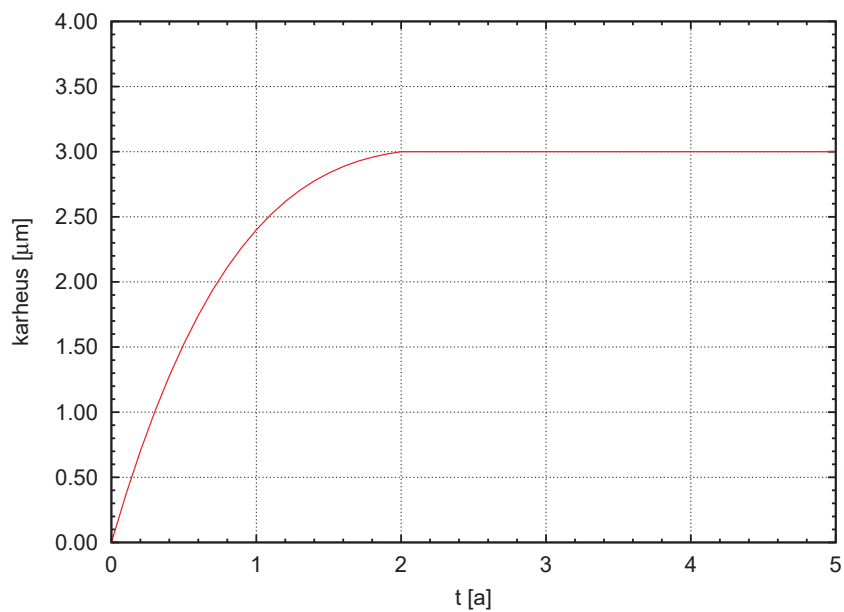


Kuva 117. Kuvat vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas: nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään kohdassa 500 EFPH, nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään kohdassa 7000 EFPH, nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen kohdassa 500 EFPH, nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen kohdassa 7000 EFPH, kun karheus kasvaa funktion 2 mukaan (1900 MW, 4600 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvua sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.

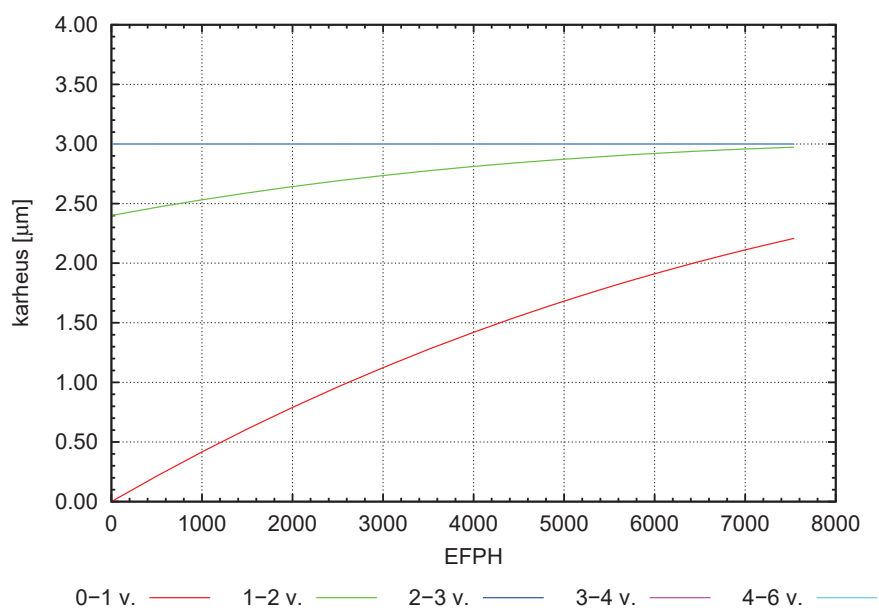


Kuva 118. Kuvat vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas: nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään kohdassa 500 EFPH, nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään kohdassa 7000 EFPH, nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen kohdassa 500 EFPH, nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen kohdassa 7000 EFPH, kun karheus kasvaa funktion 2 mukaan (1750 MW, 4000 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvaa sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.

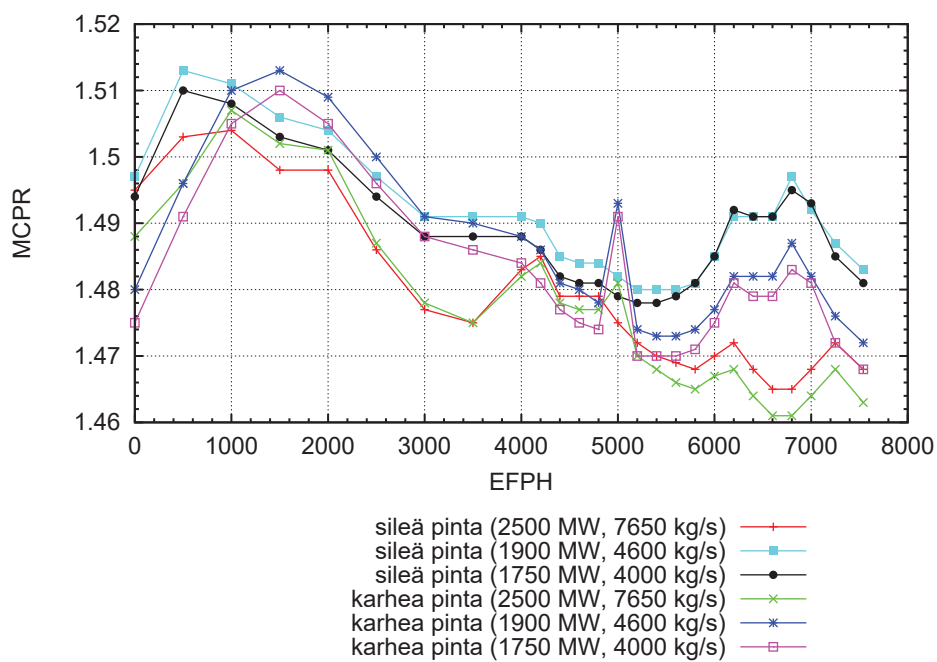
Funktio 3



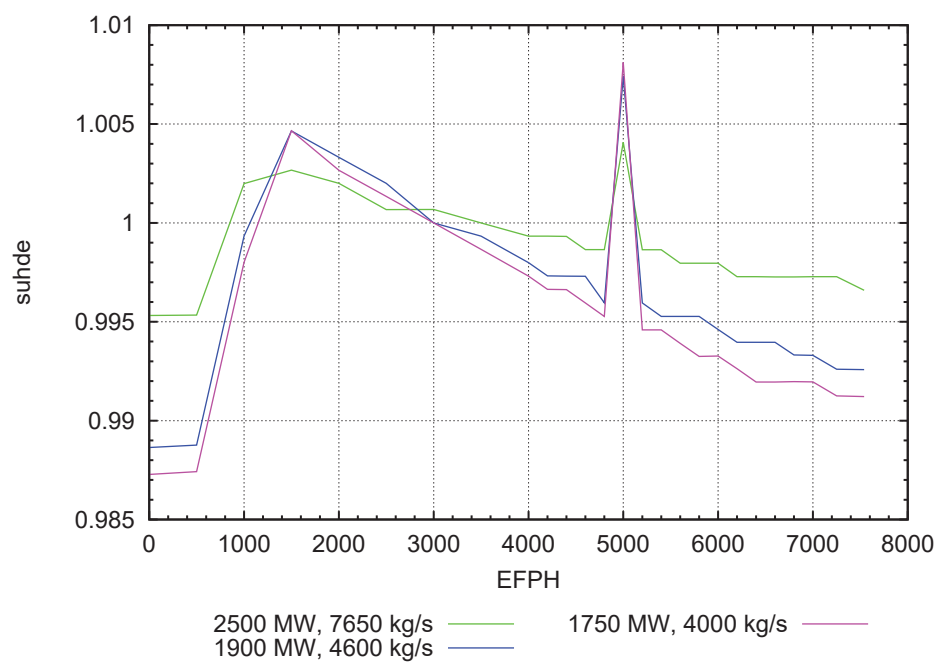
Kuva 119. Karheus ajan funktiona.



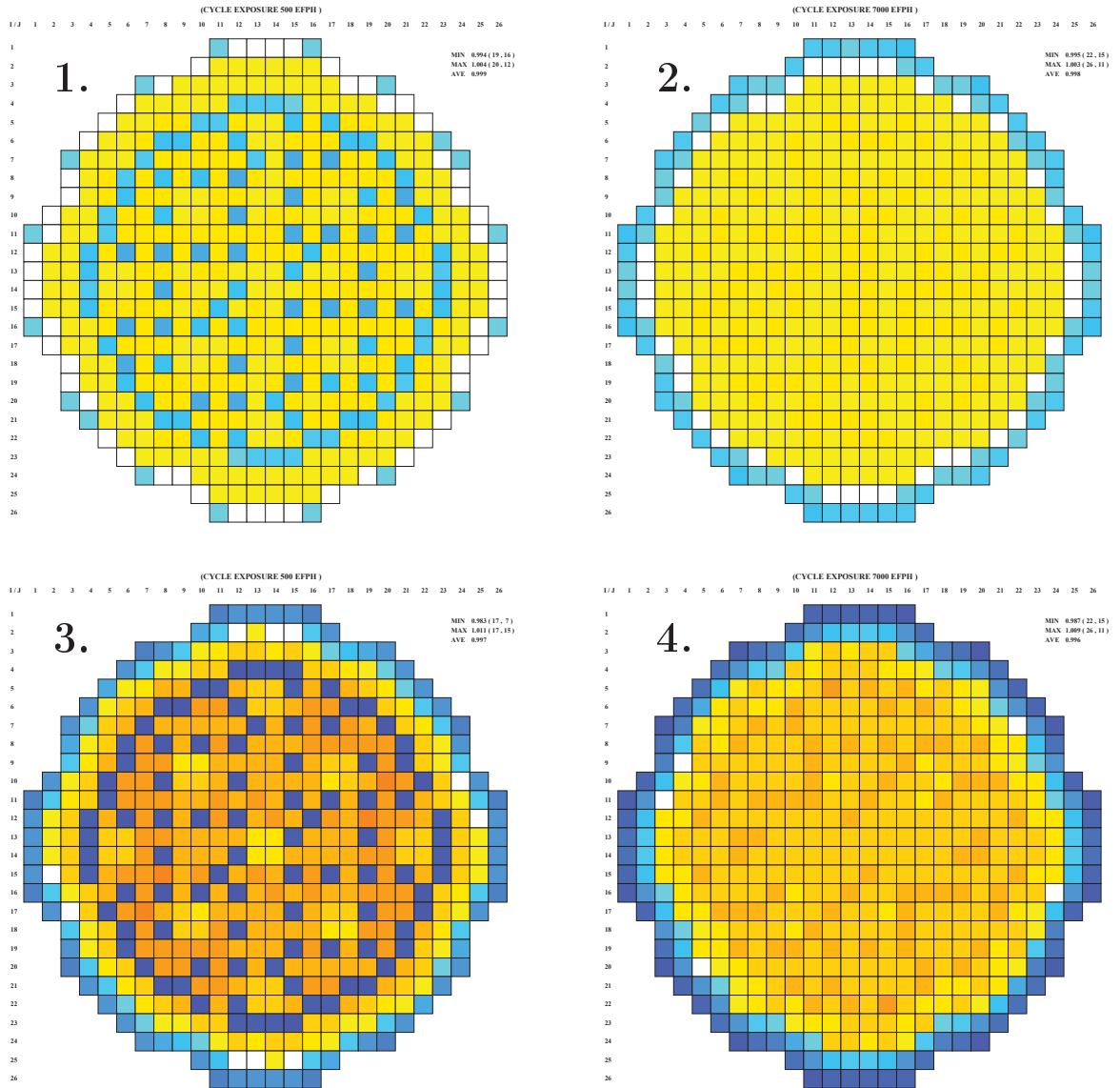
Kuva 120. Karheus ajan funktiona eri ikäluokille. 2-6 vuotiaiden käyrät ovat päällekkäin (karheus 3 μm).



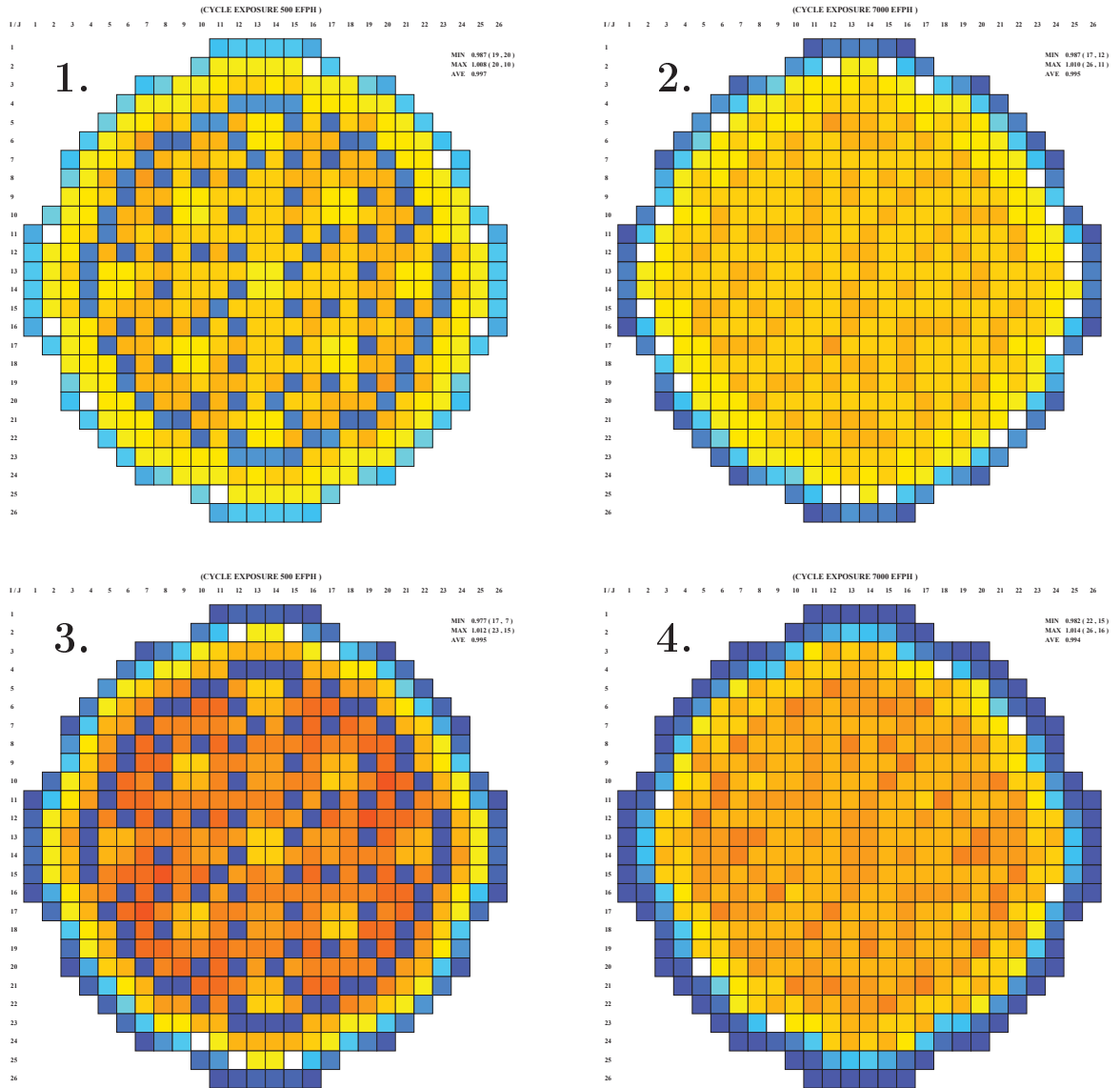
Kuva 121. Reaktorin MCPR-arvot sileälle pinnalle ja karhealle pinnalle eri ajopisteissä.



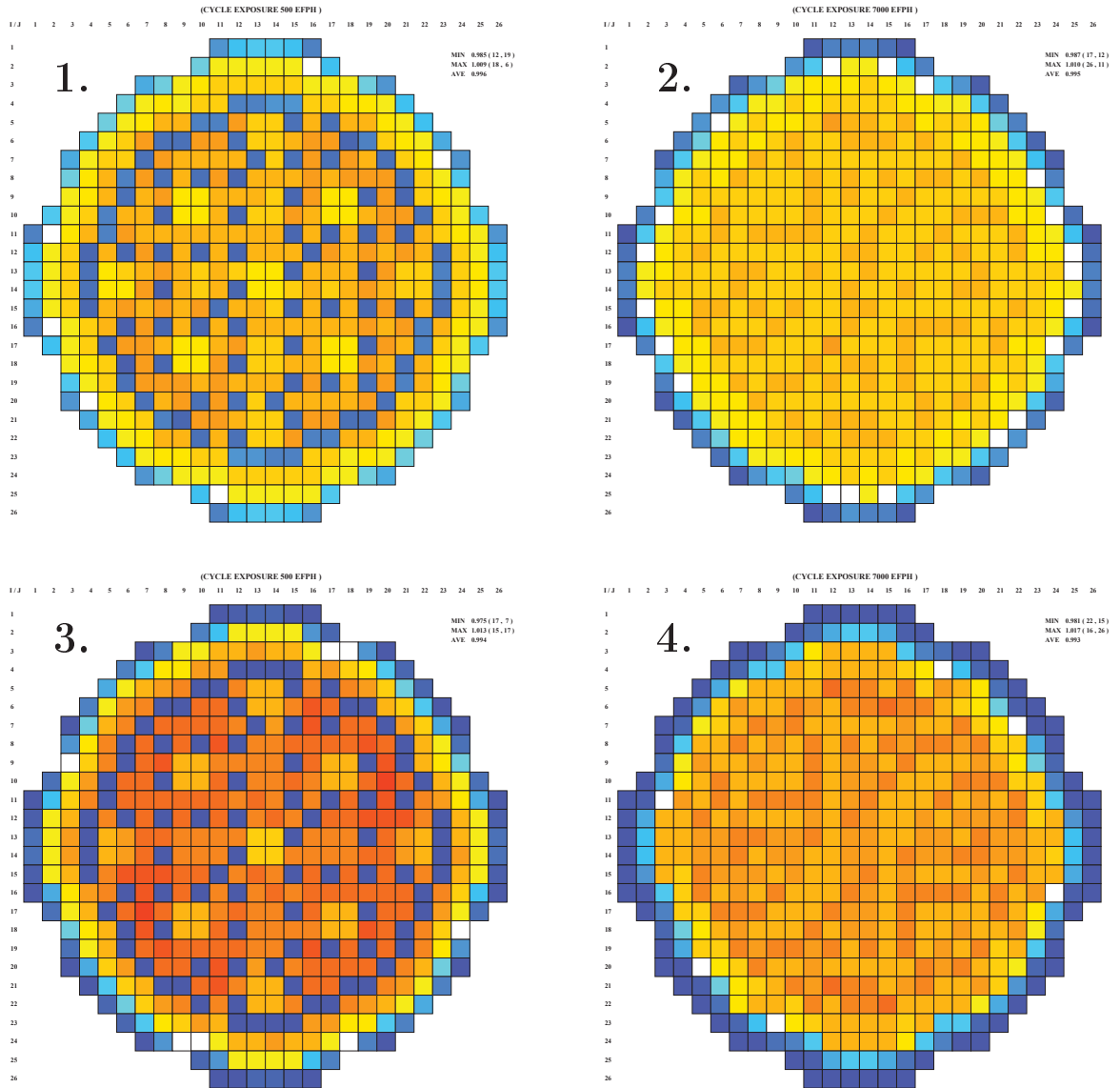
Kuva 122. Reaktorin MCPR-arvon suhde sileän pinnan MCPR-arvoon eri ajopisteissä.



Kuva 123. Kuvat vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas: nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään kohdassa 500 EFPH, nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään kohdassa 7000 EFPH, nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen kohdassa 500 EFPH, nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen kohdassa 7000 EFPH, kun karheus kasvaa funktion 3 mukaan (2500 MW, 7650 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvua sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.

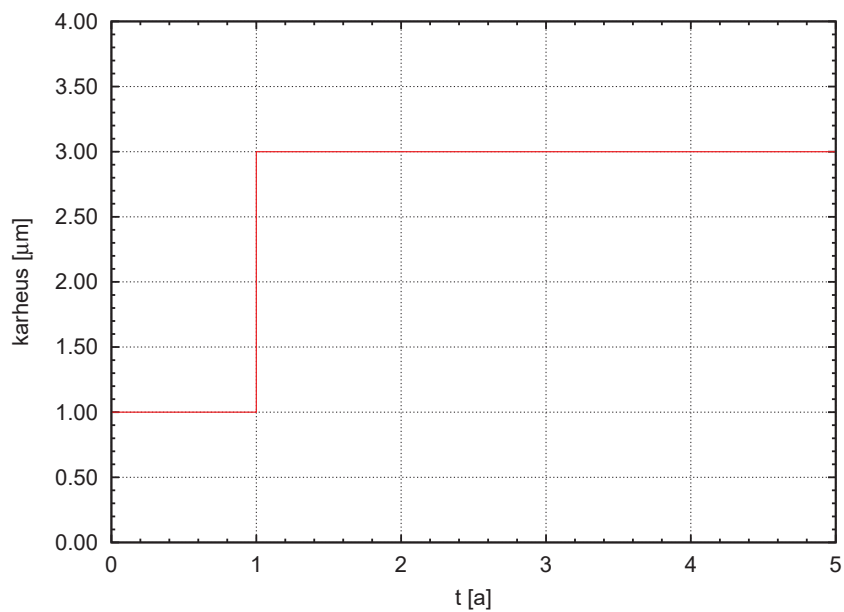


Kuva 124. Kuvat vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas: nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään kohdassa 500 EFPH, nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään kohdassa 7000 EFPH, nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen kohdassa 500 EFPH, nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen kohdassa 7000 EFPH, kun karheus kasvaa funktion 3 mukaan (1900 MW, 4600 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvu sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.

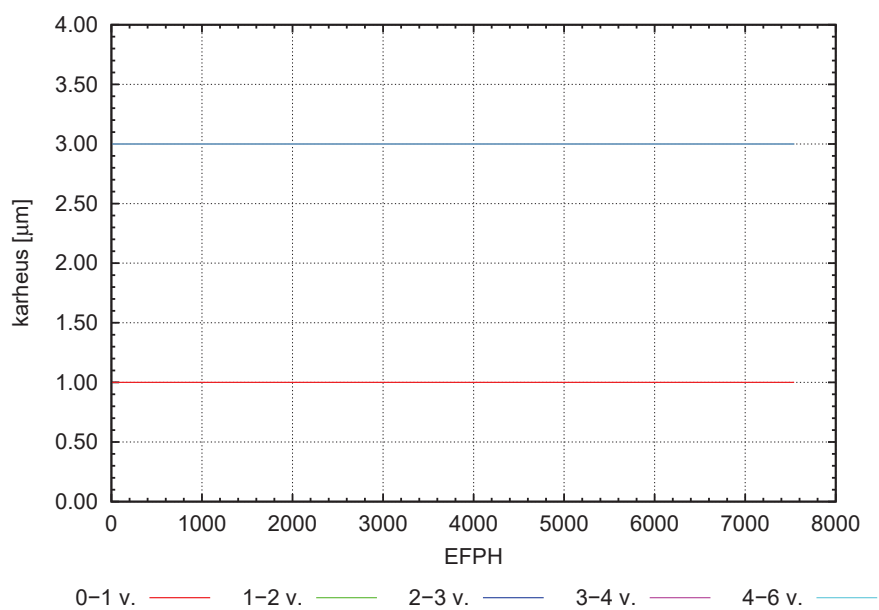


Kuva 125. Kuvat vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas: nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään kohdassa 500 EFPH, nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään kohdassa 7000 EFPH, nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen kohdassa 500 EFPH, nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen kohdassa 7000 EFPH, kun karheus kasvaa funktion 3 mukaan (1750 MW, 4000 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvu sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.

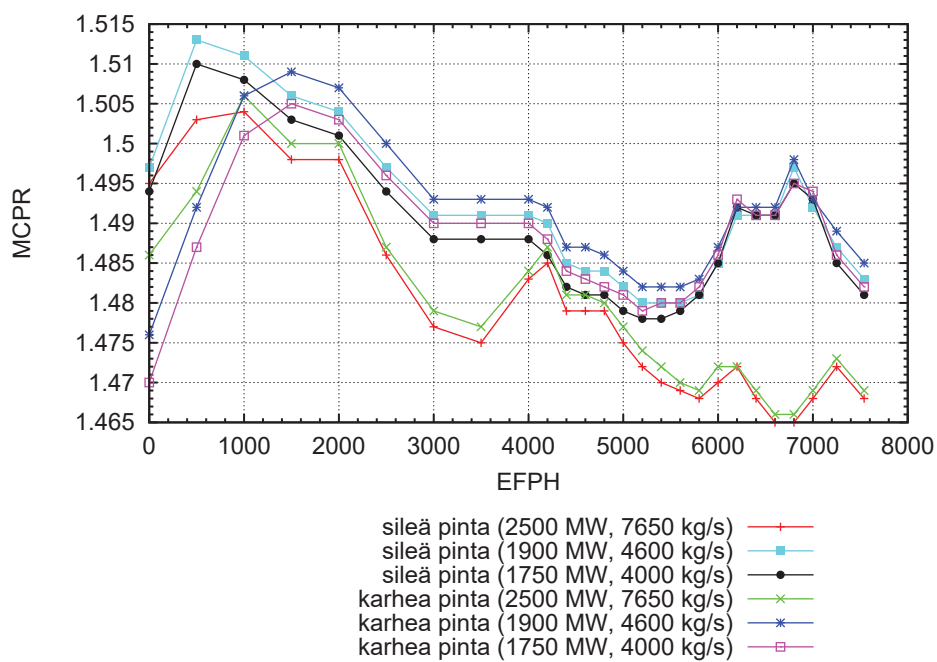
Funktio 4



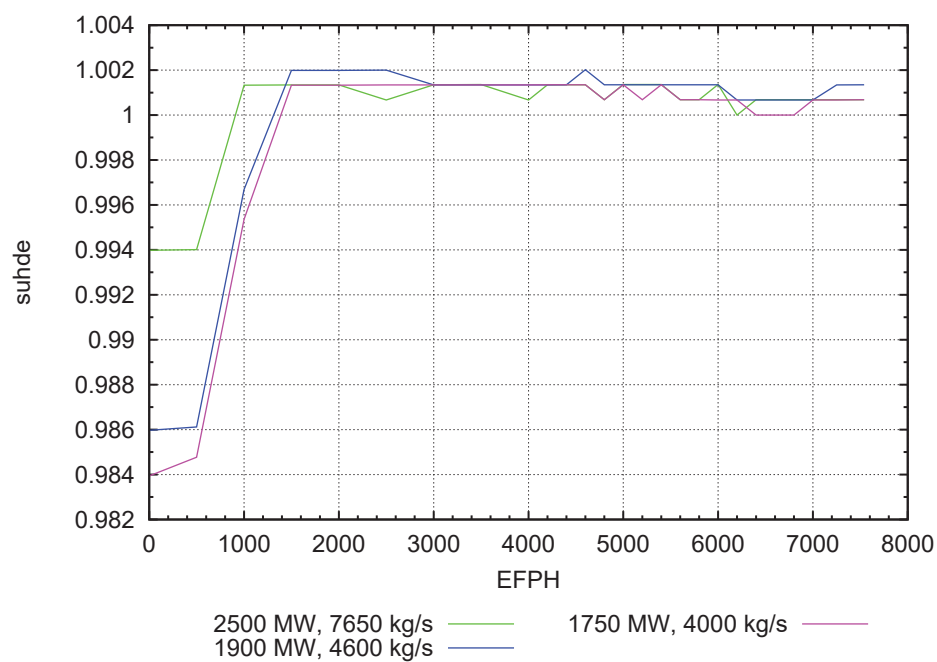
Kuva 126. Karheus ajan funktiona.



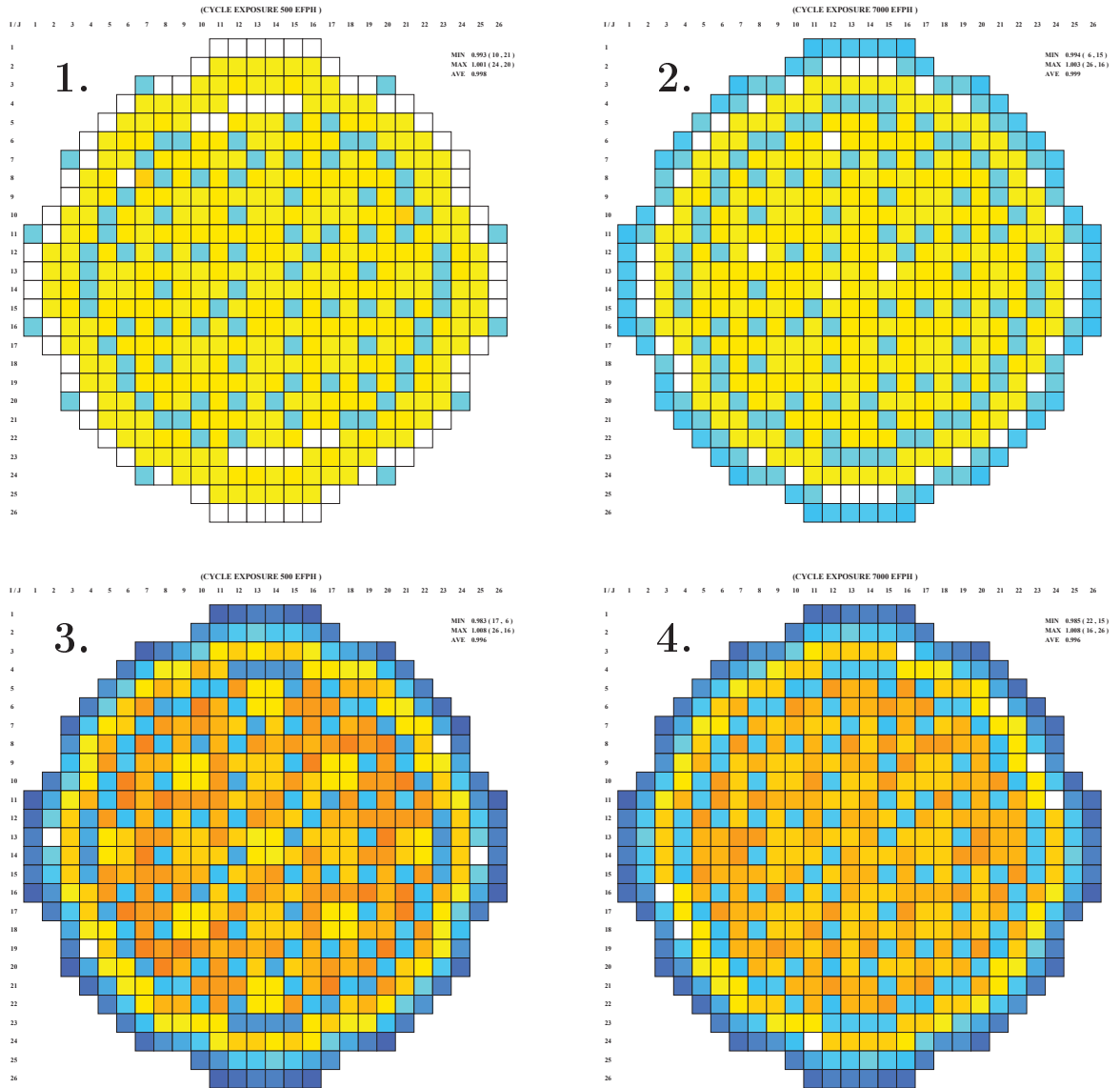
Kuva 127. Karheus ajan funktiona eri ikäluokille. 1-6 vuotiaiden käyrät ovat päällekkäin (karheus $3\ \mu\text{m}$).



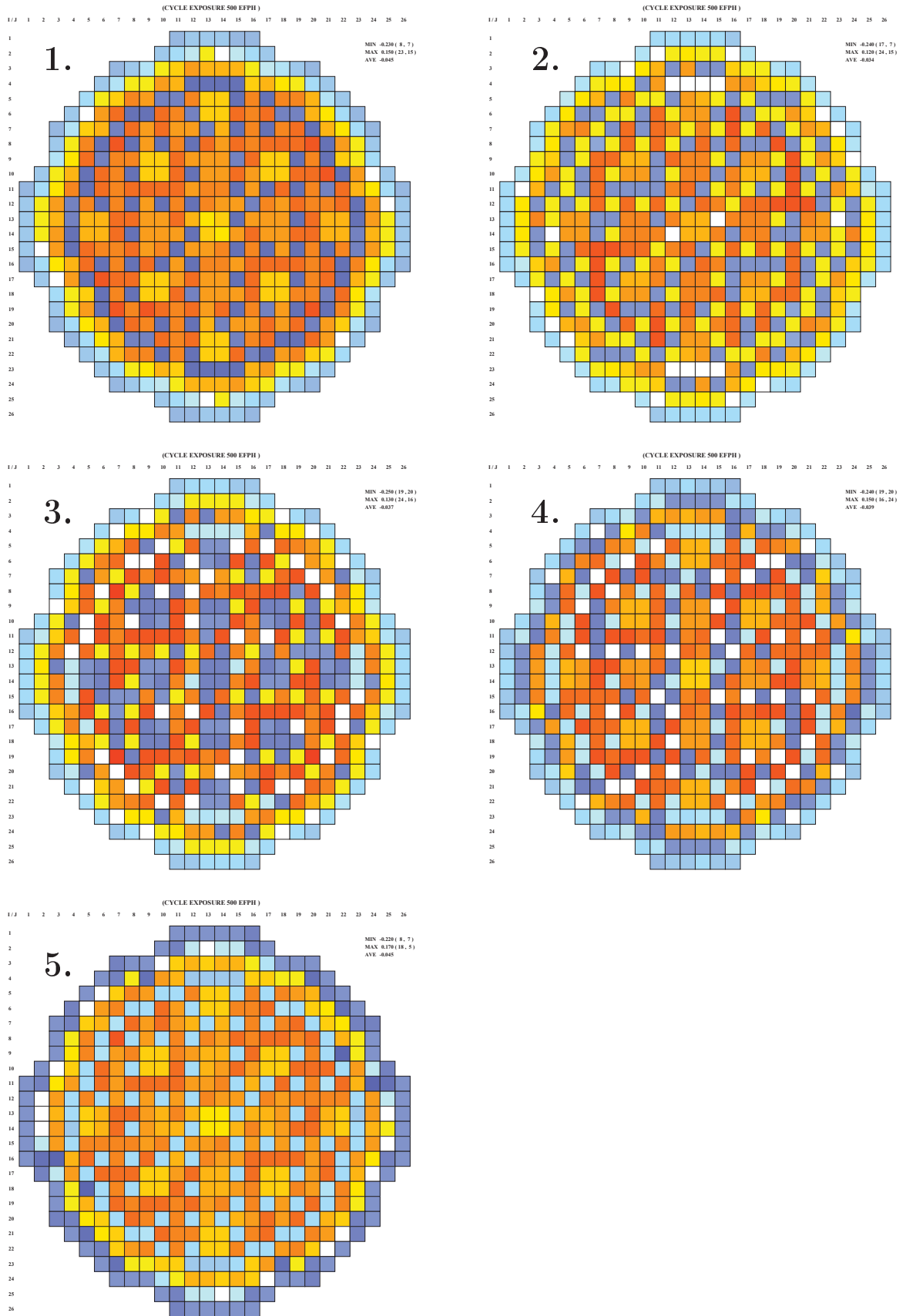
Kuva 128. Reaktorin MCPR-arvot sileälle pinnalle ja karhealle pinnalle eri ajopisteissä.



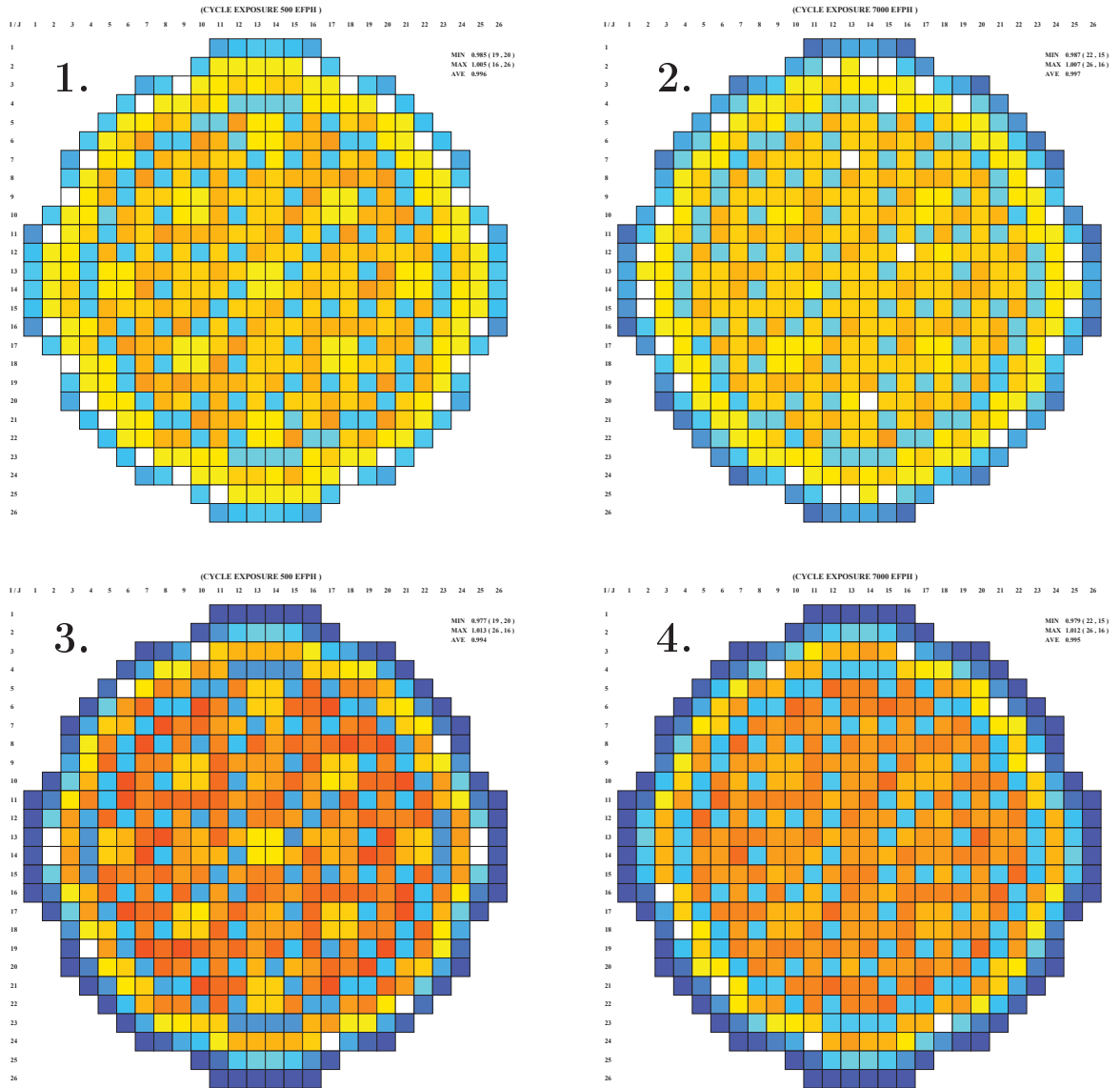
Kuva 129. Reaktorin MCPR-arvon suhde sileän pinnan MCPR-arvoon eri ajopisteissä.



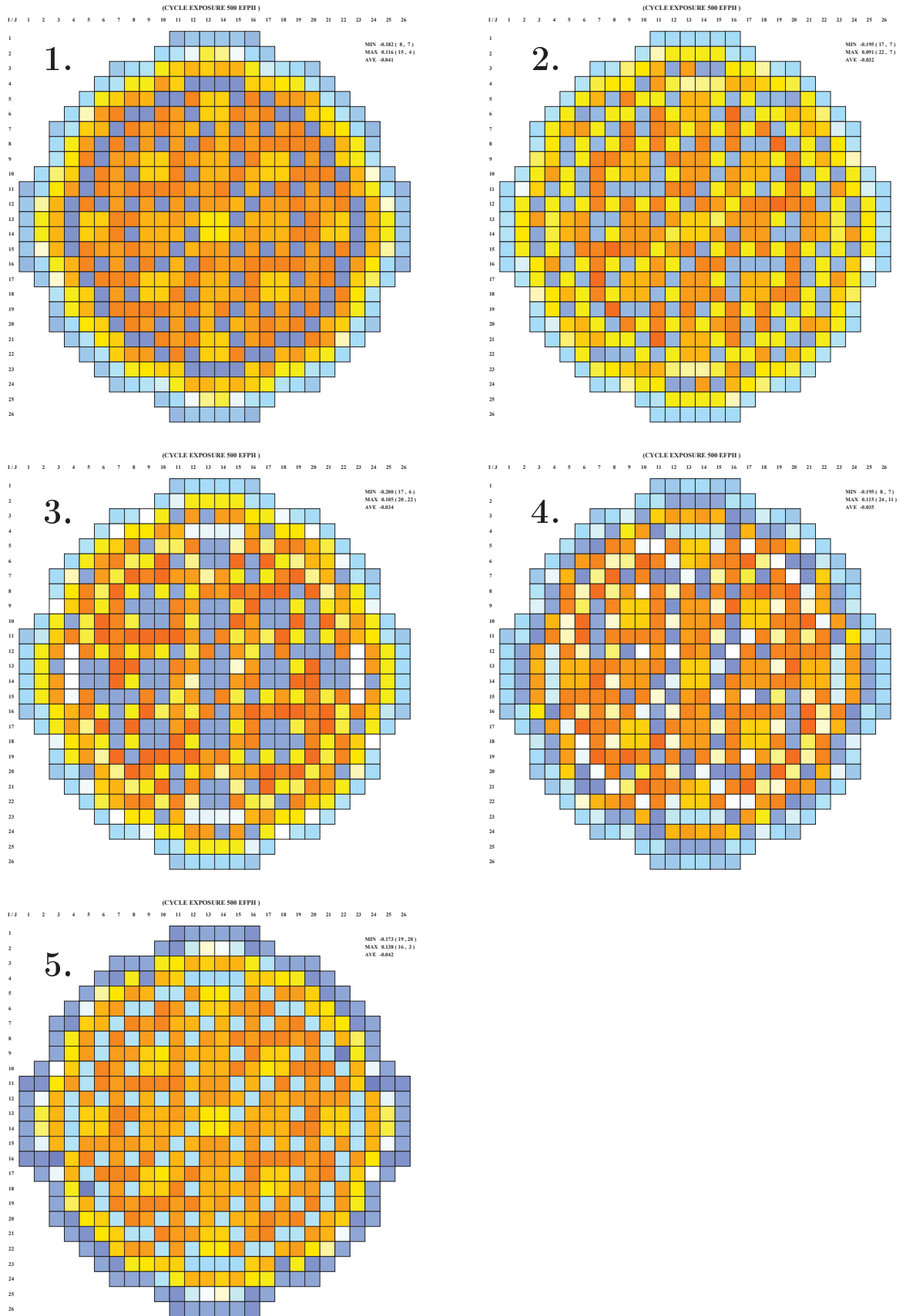
Kuva 130. Kuvat vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas: nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään kohdassa 500 EFPH, nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään kohdassa 7000 EFPH, nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen kohdassa 500 EFPH, nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen kohdassa 7000 EFPH, kun karheus kasvaa funktion 4 mukaan (2500 MW, 7650 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvua sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.



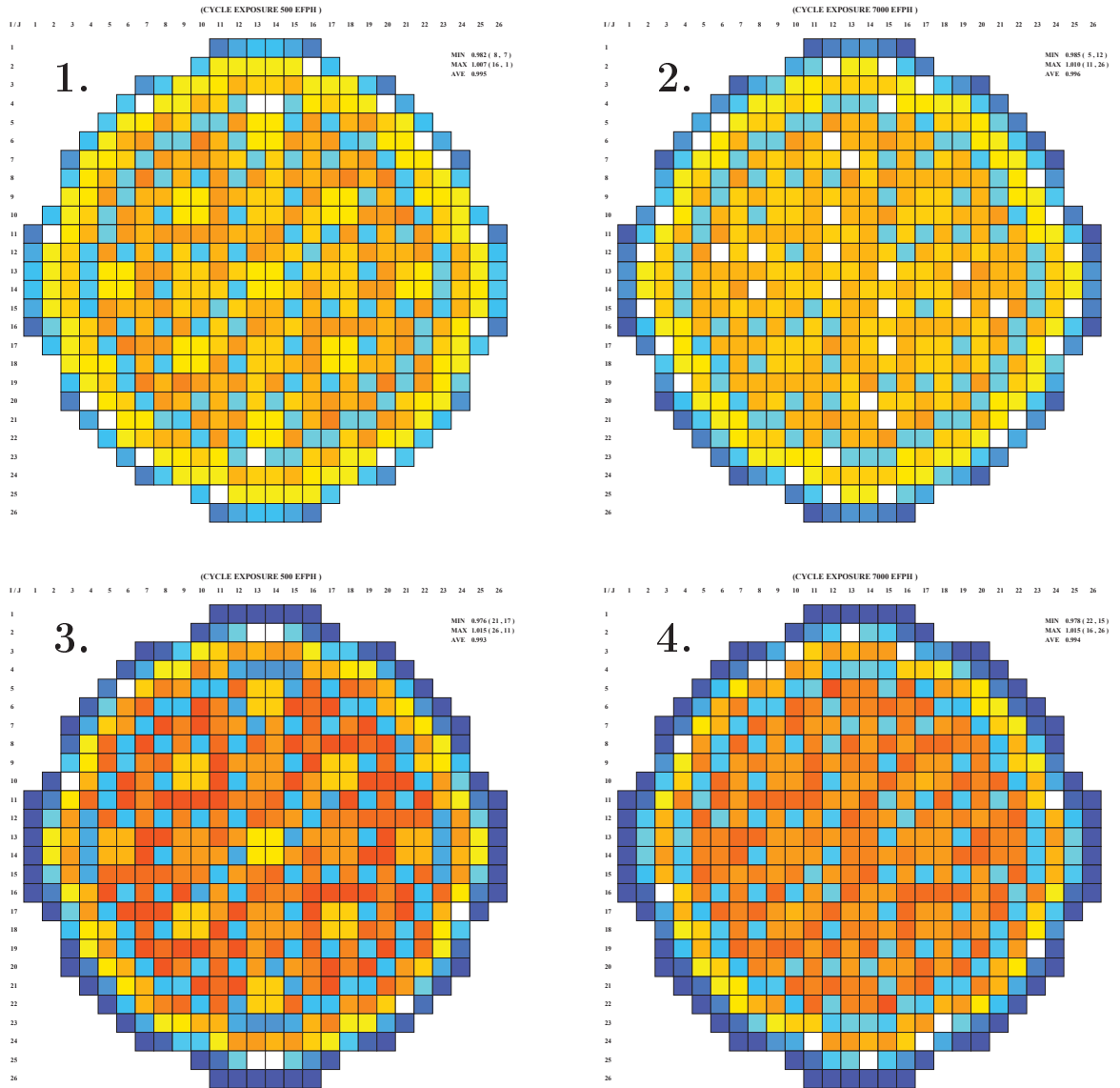
Kuva 131. Nippukohtaisen aktiivivirtauksen (karheus kasvaa funktiolla 4) ero tapaukseen, jossa yhdellä ikäluokalla on karheutta ja muut ovat sileitä (funktion 4 tapaus - yhden ikäluokan tapaus). Kuvat vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas: 0–1 vuotiailla on karheutta $1\ \mu\text{m}$, 1–2 vuotiailla $3\ \mu\text{m}$, 2–3 vuotiailla $3\ \mu\text{m}$, 3–4 vuotiailla $3\ \mu\text{m}$ ja 4–6 vuotiailla $3\ \mu\text{m}$ (2500 MW, 7650 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvua sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.



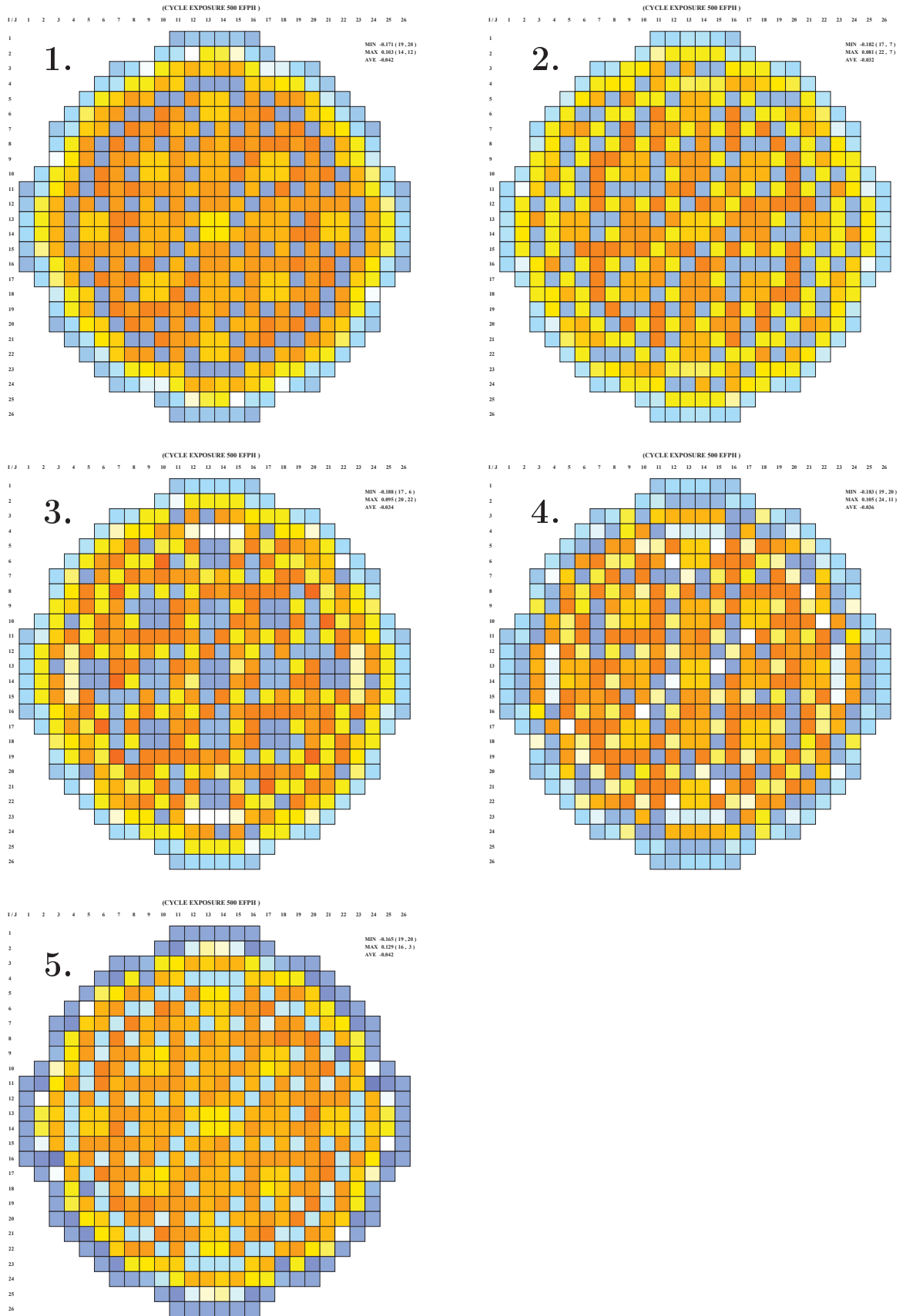
Kuva 132. Kuvat vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas: nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään kohdassa 500 EFPH, nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään kohdassa 7000 EFPH, nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen kohdassa 500 EFPH, nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen kohdassa 7000 EFPH, kun karheus kasvaa funktion 4 mukaan (1900 MW, 4600 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvua sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.



Kuva 133. Nippukohtaisen aktiivivirtauksen (karheus kasvaa funktiolla 4) ero tapaukseen, jossa yhdellä ikäluokalla on karheutta ja muut ovat sileitä (funktion 4 tapaus - yhden ikäluokan tapaus). Kuvat vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas: 0–1 vuotiailla on karheutta $1\ \mu\text{m}$, 1–2 vuotiailla $3\ \mu\text{m}$, 2–3 vuotiailla $3\ \mu\text{m}$, 3–4 vuotiailla $3\ \mu\text{m}$ ja 4–6 vuotiailla $3\ \mu\text{m}$ (1900 MW, 4600 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvua sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.



Kuva 134. Kuvat vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas: nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään kohdassa 500 EFPH, nippukohtaisen CPR:n suhde sileän pinnan CPR:ään kohdassa 7000 EFPH, nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen kohdassa 500 EFPH, nippukohtaisen aktiivivirtauksen suhde sileän pinnan aktiivivirtaukseen kohdassa 7000 EFPH, kun karheus kasvaa funktion 4 mukaan (1750 MW, 4000 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvua sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.



Kuva 135. Nippukohtaisen aktiivivirtauksen (karheus kasvaa funktiolla 4) ero tapaukseen, jossa yhdellä ikäluokalla on karheutta ja muut ovat sileitä (funktion 4 tapaus - yhden ikäluokan tapaus). Kuvat vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas: 0–1 vuotiailla on karheutta $1\ \mu\text{m}$, 1–2 vuotiailla $3\ \mu\text{m}$, 2–3 vuotiailla $3\ \mu\text{m}$, 3–4 vuotiailla $3\ \mu\text{m}$ ja 4–6 vuotiailla $3\ \mu\text{m}$ (1750 MW, 4000 kg/s). Arvon laskua on kuvattu värillä, joka muuttuu keltaisesta punaiseen, ja kasvua sinisellä. Tummempi väri viittaa suurempaan laskuun tai kasvuun.